

01:09

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ ТОКА В МОНОКРИСТАЛЛЕ ВОЛЬФРАМА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

А.Б.Ринкевич

Рассмотрено распространение электромагнитных волн в передающей линии, через центральный проводник которой пропускается импульсный ток. Обнаружено, что неустойчивости в распространении волны возникают, если существует компонента тока вдоль внешнего магнитного поля. Воздействие тока на параметры волны может быть описано изменением структуры поверхностных высокочастотных токов. Получены данные о спектральном составе огибающей импульсов электромагнитной волны.

Введение

В электродинамическом отношении чистый металл, находящийся при низкой температуре, представляет собой нелинейную среду. Роль фактора, воздействующего на металл и изменяющего его свойства, может играть электрический ток. Подробно изучалась группа явлений, возникающих при достижении дрейфовой скоростью носителей тока скорости звука [1]. Другая группа явлений связана с воздействием магнитного поля тока или волны на проводимость металла. Возможны генерация гармоник электромагнитной волны [2], стохастическое изменение во времени поверхностного импеданса [3].

В работе [4] сообщалось о наблюдении нескольких нелинейных явлений при распространении поверхностной волны вдоль границы металла. В отличие от [2,3] измерения были выполнены в режиме бегущей волны. Оказалось, что если сила тока в импульсе и напряженность постоянного магнитного поля превышают некоторые пороговые значения, то амплитуда прошедшей волны меняется неперiodическим образом во время и позже действия импульса тока. Изменения амплитуды электромагнитной волны (ЭВМ) под действием одиночного импульса тока были названы нестационарными явлениями. Если картина нестационарных явлений изменяется от импульса к импульсу, то это значит, что в системе возникает неустойчивость. Эти явления наблюдались в электродинамической системе, представляющей собой меандровую линию, через центральный проводник которой пропускался электрический ток. Помимо неустойчивости были обнаружены интенсивная генерация гармоник поверхностной волны [5], а также резкое ослабление

амплитуды прошедшей волны при некоторых специально подобранных условиях эксперимента [6].

До настоящего времени, однако, не выявлена полная физическая картина процессов, происходящих при протекании сильного электрического тока через металл. Экспериментально наблюдалось турбулентное распространение электрического тока в металле [7]. Что касается нелинейных высокочастотных явлений [4-6], то здесь не ясен механизм воздействия импульса тока на параметры волны.

Возможность образования градиентов температуры в металле и поэтому генерации термомагнитных волн исследовалась в [8], где был сделан вывод о том, что возникновение градиента температур не может служить основной причиной взаимодействия. В этой работе рассмотрим взаимодействие тока и волны с чисто электродинамической точки зрения, как процесс возбуждения волн в длинной линии сторонними токами. Поскольку структура полей в изучавшейся ранее меандровой линии достаточно сложна, то представлялось целесообразным провести эксперименты с более простыми электродинамическими системами. Это экранированные линии, центральный проводник которых выполнен в виде пластины или стержня. Такая конфигурация проводника с током позволяет в отличие от меандра измерять нелинейные явления, когда внешнее магнитное поле либо перпендикулярно, либо параллельно току. Цель настоящей работы — экспериментально исследовать условия возникновения и развития неустойчивости, влияние взаимной ориентации тока и магнитного поля, а также определить механизм воздействия тока на параметры электромагнитных волн.

Методика эксперимента

Все эксперименты выполнены с образцами проводников, вырезанными из монокристаллов особо чистого вольфрама. Образец в виде стержня имел размеры $15 \times 1 \times 1$ мм, а в виде пластины — $24 \times 6 \times 0.5$ мм. Образец помещался в криостат с температурой $T = 4.2$ К и прикладывалось магнитное поле индукцией до 7 Тл. Образец являлся частью линии, модуль коэффициента передачи которой измерялся как функция внешних параметров и времени.

Измерения проводились в частотном диапазоне 1.2-2.3 ГГц с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис. 1. Генератор импульсов Г5-56, играющий роль хронизатора 1, модулирует сигнал генератора 2 высокой частоты Г4-78 или Г4-79, формируя радиоимпульсы прямоугольной формы длительностью от десятков мкс до единиц мс. Эти радиоимпульсы мощностью менее 1 мВт поступают на измерительную ячейку 3 и после прохождения исследуемого образца передающей линии попадают на приемник 4 (П5-4Б). Огибающая радиоимпульса наблюдается на осциллографе 5 типа С1-55. Амплитуда импульсов записывается на самописце 6. От хронизатора запускается генератор модуляционных импульсов 7 (Г5-50). После эмиттерного повторителя 8 на транзисторах КТ926 импульс тока поступает на образец. Развязка цепи токового импульса с высокочастотным трактом осуществляется фильтрами нижних частот 9, где индуктивность представляет собой экранированную спираль. Фильтры нижних частот располагаются в непосредственной близости от образца. Сигнал, пропорциональный силе тока с шунта 10, поступает на осцилло-

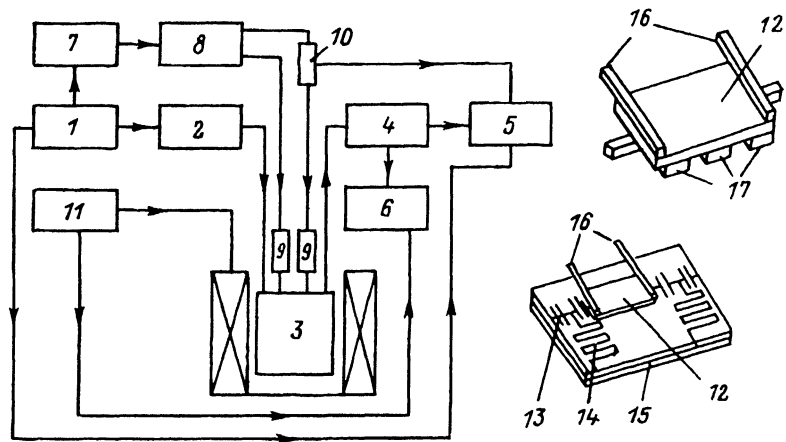


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и варианты расположения образца в измерительной ячейке.

граф 5. Управление током сверхпроводящего соленоида осуществляется источником ИТ-75 11.

Измерительная ячейка 3 содержит образец 12 и фильтры верхних частот с сосредоточенными емкостями 13 и распределенной индуктивностью 14. Ячейка смонтирована на пластине из стеклотекстолита, помещенной на латунное основание 15. Токоподводы 16 прикреплялись к образцу индием марки ИНОО.

Кроме этого, использовалась модификация измерительной ячейки, в которой импульс тока протекал по образцу 12, а возбуждение электромагнитной волны осуществлялось дополнительной меандровой линией 17. Линия 17 подсоединялась к фильтрам верхних частот. Электрический контакт между линией и образцом предотвращала прослойка калки толщиной 40 мкм.

Таким образом, на вход измерительной ячейки поступает радиоимпульс мощностью порядка 10^{-4} Вт. Измеряется амплитуда сигнала после прохождения ячейки, через центральный проводник которой пропускается импульсный ток. Электромагнитная волна проникает в металл на глубину скин-слоя. Она служит индикатором процессов, происходящих в металле под действием сильного тока.

Погрешность измерения силы тока в импульсе составляет около 7% а погрешность измерения напряженности магнитного поля 3%. С помощью анализатора спектра СК4-56 были измерены спектры огибающей радиоимпульсов. Осциллографические измерения выполнены без оценки погрешности.

Нестационарные явления и неустойчивость

Как показали эксперименты, нестационарные явления и неустойчивость в распространении ЭМВ наблюдаются, когда центральный проводник имеет форму стержня или пластины. Для стержня осциллограммы огибающей радиоимпульса частотой $f = 2262$ МГц при разных значениях силы тока в импульсе показаны на рис. 2. В этом эксперименте длительность импульса тока τ_J , показанного внизу, составляла 140 мкс, длительность радиоимпульса $\tau_{br} = 1.5$ мс. Период следования

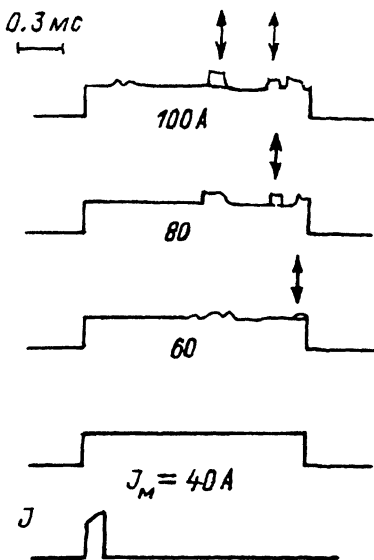


Рис. 2. Нестационарные явления и неустойчивость при распространении электромагнитных волн.

Образец — стержень, $q \parallel H_0 \parallel J$.

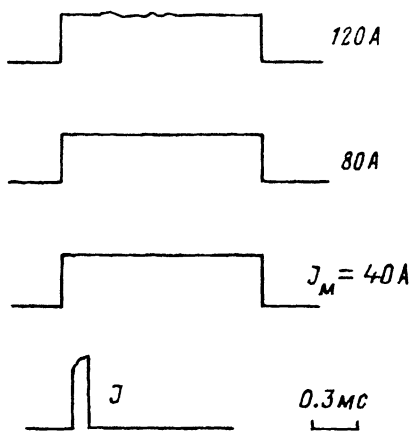


Рис. 3. То же, что рис. 2, но $J \perp H_0$, $q \parallel J$.

импульсов $T_n = 50$ мс, а индукция магнитного поля $B = 6$ Тл. При значениях силы тока J_M свыше 50 А возникают искажения первоначально прямоугольной формы огибающей. Если $J_M > 60$ А, то возникает неустойчивость, которая фиксируется по изменению формы огибающей от импульса к импульсу. Участки осциллограммы, где есть такие изменения, отмечены двойными стрелками. В этом эксперименте образец ориентировался по отношению к магнитному полю таким образом, что направление распространения волны, внешнего магнитного поля H_0 и тока совпадали $q \parallel H_0 \parallel J$ (q — волновой вектор).

Как видно из рис. 2, наблюдаются явления, очень сходные с теми, что наблюдались при протекании тока через меандровую линию [4]. Представляло интерес выяснить, влияет ли ориентация поля и тока на нелинейные электродинамические явления. Для выяснения этого образец и токоподводы располагались таким образом, что теперь выполнялись условия $H_0 \perp J$ и $q \parallel J$. Результаты представлены на рис. 3. Частота волны, напряженность магнитного поля, длительность импульса тока и период повторения варьировались с тем, чтобы получить столь возможно яркую картину нестационарных явлений. Значения этих параметров для осциллограмм рис. 3 следующие: $f = 2341$ МГц, $B = 5$ Тл, $\tau_J = 120$ мкс, $T_n = 70$ мс. Как видно из этого рисунка, лишь при наибольшем значении силы тока в 120 А удалось выявить небольшие искажения огибающей импульса. Эти искажения могли появиться в результате того, что условие $J \perp H_0$ выполнялось в эксперименте с погрешностью до 5° . Во всяком случае, наблюдать нестационарные явления при $J \perp H_0$ значительно труднее, чем при $J \parallel H_0$. Неустойчивости в распространении ЭВМ при $J \perp H_0$ вообще не наблюдались.

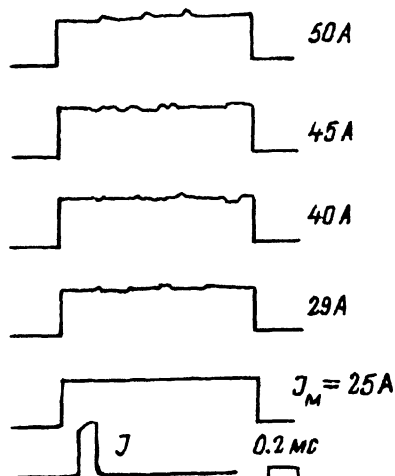


Рис. 4. Нестационарные явления при возбуждении и измерении электромагнитной волны меандровой линией и пропусканием тока через пластину вольфрама.

Выполненные эксперименты позволяют сделать два вывода. Во-первых, для наблюдения нестационарных явлений и неустойчивости нужна компонента тока вдоль направления магнитного поля. Эксперимент, результаты которого показаны на рис. 3, выполнен в условиях статического скин-эффекта для тока в образце вольфрама. Поэтому второй вывод говорит о том, что хотя этот эффект оказывает влияние на рассматриваемые нелинейные явления [8], он сам по себе не является достаточной причиной для их реализации.

Далее был поставлен эксперимент, когда импульс тока проходил через пластину чистого вольфрама, а электромагнитная волна формировалась меандровой линией. Эта линия располагалась на небольшом расстоянии 40 мкм от пластины, поэтому высокочастотные поля достигали поверхности образца и проникали в глубину его на глубину скин-слоя. В этом эксперименте и всех последующих использовался образец в форме пластины и ориентация образца была такова, что $\mathbf{q} \parallel \mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{J}$. Как видно из рис. 4, в этом случае наблюдались нестационарные явления, имевшие наибольшую величину при $f = 2262$ МГц, $T_n = 30$ мс, $\tau_J = 100$ мкс. Магнитная индукция составляла 6 Тл. Этот эксперимент показал важность электромагнитных полей в процессе воздействия тока на ЭВМ. При такой постановке эксперимента влияние тепловых процессов и деформации высокочастотной линии из-за действия пондеромоторной силы сведено к минимуму.

Таким образом, учитывая результаты экспериментов и выполненные ранее работы [4,8], удалось установить основные черты взаимодействия электромагнитных волн с импульсом тока в металле. Существование порога по току у нестационарных явлений, зависимость их от взаимной ориентации тока и магнитного поля показывают, что причина нелинейности состоит в действии импульса сильного тока на металл. Нелинейные явления зависят от частоты ЭВМ, но не зависят от ее амплитуды [9]. Все сказанное позволяет квалифицировать наблюдаемые явления как нелинейно-параметрические с запаздыванием.

Имея в виду результаты работ [7,10], можно предполагать следующую картину. Линии импульсного тока сосредоточены преимущественно у поверхности образца. Высокочастотное поле сосредоточено в металле в тонком скин-слое. Высокочастотное магнитное поле \mathbf{H} вызывает на поверхности образца токи с поверхностной плотностью $\mathbf{I} = [\mathbf{H}\mathbf{N}]$, где \mathbf{N} — нормаль к поверхности, направленная в глубь металла. При малых значениях силы тока, который не изменяет существенно материальных характеристик металла, его течение ламинарно. Взаимодействие между импульсным током и высокочастотным полем практически отсутствует. При достаточно больших значениях силы тока его распределение по сечению образца изменяется, если появляется турбулентность тока. Из-за вихревой структуры токовых линий происходят процессы перемещения электронов в глубь металла и искажение линий высокочастотных токов на поверхности. Такое возможно, если в металле при низкой температуре длина свободного пробега электрона превышает глубину скин-слоя.

Поэтому вполне уместно рассматривать изменение амплитуды электромагнитной волны, прошедшей систему, как результат изменения в расположении и характеристиках источников, возбуждающих систему. Как известно [11], поле в передающей линии представляет собой суперпозицию собственных волн, уходящих от области локализации источников. В нашем случае источники нестационарных явлений — это возмущения структуры поверхностных токов, возникающие из-за турбулентности импульсного тока.

Сказанное косвенно подтверждается результатами проведенных экспериментов с разной ориентацией магнитного поля и тока. В случае ориентации $\mathbf{J} \parallel \mathbf{H}_0$ возникающие турбулентные потоки должны иметь в основном перпендикулярную сильному магнитному полю компоненту. Они определяются главным образом бездиссипативными недиагональными компонентами тензора проводимости. Иная ситуация возникает при $\mathbf{J} \perp \mathbf{H}_0$, когда внешнее поле не способствует перемешиванию токовых слоев.

Если применить лемму Лоренца к объему линии, ограниченному сечением слева от источников, сечением справа и поверхностями проводников между этими сечениями, включая глубину скин-слоя, то можно определить амплитуду E^m волны, бегущей в положительном направлении оси z . Учитывая условие нормировки собственной волны с номером $n \int [\mathbf{E}_n \mathbf{H}_n]_z dV = -kq_n$, имеем для амплитуды выражение [11]

$$E_n^m(z) = -\frac{1}{\omega} \frac{1}{q_n} \int_{V(z)} (\mathbf{j}^{(e)} \mathbf{E}_{-n} - \mathbf{j}^{(m)} \mathbf{H}_{-n}) dV, \quad (1)$$

где q_n — волновое число n -й моды, $\mathbf{j}^{(e)}$ и $\mathbf{j}^{(m)}$ — плотности электрических и магнитных высокочастотных токов в скин-слое.

Интегрирование в (1) ведется по объему, ограниченному справа точкой наблюдения с координатой z . Зависимость высокочастотного электрического поля от координаты z определяется не только экспонентой $\exp(-iq_n z)$, но и функцией $E_n^m = E_n^m(z)$. Поэтому нестационарные явления могут быть различными в различных сечениях линии.

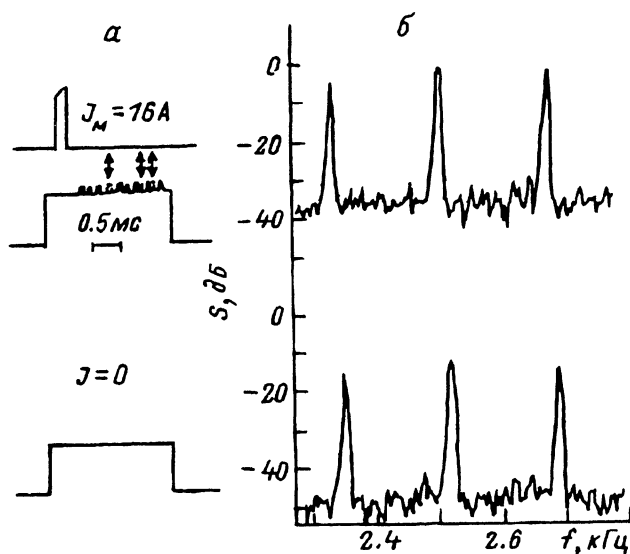


Рис. 5. Огибающая радиоимпульса электромагнитных волн (а) и участки спектра огибающей (б).

$f = 2109 \text{ МГц}$, $B_0 = 5 \text{ Тл}$, $T_n = 60 \text{ мс}$, $\tau_J = 106 \text{ мкс}$.

Такое явление наблюдалось в [6]. Изменение огибающей радиоимпульса волны отвечает той структуре турбулентности импульсного тока, которая реализуется в образце.

Измерения спектра огибающей

В описании механизма взаимодействия электромагнитной волны с импульсным током важное место занимает представление о турбулентной составляющей поверхностной плотности высокочастотных токов. Поэтому резонно ожидать, что стохастическое поведение будет свойственно характеристикам волны. Проиллюстрируем возможность появления хаоса в параметрах электромагнитной волны измерениями спектра огибающей радиоимпульса. На рис. 5 показана форма импульса огибающей (а) и соответствующие спектры (б). В отсутствие импульса тока форма огибающей радиоимпульса прямоугольная. Спектр состоит из эквидистантных линий, отстоящих друг от друга на величину частоты повторения. Уровень шумовых сигналов соответствует $-50 - -40 \text{ dB}$. При включении импульсов тока достаточно большой амплитуды вследствие неустойчивости в распространении волны появляются области, в которых амплитуда изменяется от импульса к импульсу неперiodическим образом. Поэтому такому сигналу соответствует характерный для стохастичности сплошной спектр, имеющий уровень $-30 - -40 \text{ dB}$ на рис. 5. Разумеется, в спектре остаются и линии.

В заключение кратко перечислим основные результаты, полученные в работе. Было экспериментально показано, что для развития нелинейных явлений в передающей линии из чистого металла необходима компонента импульсного тока, параллельная внешнему магнитному полю. Воздействие тока на высокочастотную волну передается

посредством электромагнитных полей и токов в поверхностном слое проводника. Наличие взаимодействия тока и волны в принципе может быть описано в рамках представлений о возбуждении передающей линии сторонними токами.

Список литературы

- [1] *Пустовойт В.И.* // УФН. 1969. Т. 97. № 2. С. 257–306.
- [2] *Виткалов С.А., Гантмагер В.Ф., Левиев Г.И.* // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. Вып. 6. С. 2233–2240.
- [3] *Волошин И.Ф., Кравченко С.В., Фишер Л.М.* // ДАН СССР. 1986. Т. 287. № 1. С. 107–111.
- [4] *Ринкевич А.Б., Пономарева М.В., Устинов В.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. Вып. 9. С. 494–497.
- [5] *Ринкевич А.Б., Устинов В.В., Пономарева М.В.* // РиЭ. 1991. Т. 36. № 4. С. 647–652.
- [6] *Ринкевич А.Б.* // РиЭ. 1992. Т. 37. № 8. С. 1524–1527.
- [7] *Зазарченко С.И., Кравченко С.В., Фишер Л.М.* // XXV Всесоюз. совещание по физике низких температур. Л., 1988. Ч. 32. С. 5.
- [8] *Ринкевич А.Б.* // Физика металлов и металловедение. 1992. № 2. С. 27–34.
- [9] *Ринкевич А.Б., Пономарева М.В.* Деп. в ВИНТИ. 1991. № 135-В91. 26 с.
- [10] *Копылов В.Н.* // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 7. С. 1948–1955.
- [11] *Каценеленбаум Б.З.* Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966. 240 с.

Институт физики металлов
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
30 ноября 1992 г.
В окончательной редакции
23 апреля 1993 г.