



ЭЛЕМЕНТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКА

А.Б. Ринкевич

Рассмотрены экспериментальные результаты изучения распространения электромагнитных волн в меандровой линии, помещенной в магнитное поле при низкой температуре. Через центральный проводник линии, изготовленный из монокристалла вольфрама или алюминия, пропускались импульсы сильного электрического тока. Наблюдались изменения амплитуды электромагнитной волны как нерегулярные, так и свидетельствующие о существовании пространственной и временной когерентности в системе.

В металлах при низких температурах существует целый ряд нелинейных высокочастотных эффектов. Под действием электромагнитной волны большой амплитуды, падающей на поверхность, в металле возникает токовое состояние - индуцированное постоянное магнитное поле [1]. По мере роста амплитуды волны поверхностный импеданс металла, начиная с бифуркации Хопфа, совершает серию бифуркаций, переходя к хаосу. Если помимо поля волны присутствует еще и постоянное магнитное поле, то может быть реализован режим перемежающегося хаоса [2]. Были поставлены эксперименты, показавшие, что электромагнитная волна переключения способна проникать в металл на глубину, значительно превышающую скин-глубину [3]. Кроме того, в металле возможно образование стационарных диссипативных структур [4]. При этом образец металла распадается на несколько областей, в которых индуцированное магнитное поле токового состояния отличается знаком. Состояние, в котором индуцированное поле антипараллельно внешнему, метастабильно. Теория электромагнитных автоволн в металлах построена в [5]. Уравнения Максвелла совместно с эффективным граничным условием сводятся к уравнениям параболического типа для полного магнитного поля. Существуют как статические решения этого уравнения, так и волны переключения. При неустойчивости вектор Пойнтинга оказывается направленным в глубь металла. Электромагнитная волна проникает в металл и диссипирует в нем, создавая условия для образования автоволновых структур.

В [6] предсказана возможность создания токовых состояний в магнитном поле сильного электрического тока. Были проведены экспериментальные исследования воздействия импульсного или постоянного токов на электромагнитные волны. В работе [7] установлены неустойчивость и метастабильный хаос амплитуды волны в меандровой линии. Переход к хаосу осуществляется по сценарию через перемежаемость. Было обнаружено неэкспоненциальное распределение амплитуды по длине линии [8], а также существование волн переключения. Поэтому в меандровой линии представлялось

возможным появление самоорганизации электромагнитных волн. Для проверки такой возможности были предприняты эксперименты по изучению осцилляционных явлений в амплитуде высокочастотных электромагнитных волн, поиск условий существования упорядоченности в них, а также определение характеристик распределения поля волны вдоль линии.

Эксперименты были выполнены с отрезками экранированных линий, центральный проводник которых имел форму меандра. Этот проводник изготовлен из монокристаллов чистого алюминия или вольфрама. Линия помещалась в криостат с температурой $T = 4.2$ К. Внешнее магнитное поле индукцией B до 8 Тл прикладывалось вдоль направления волнового вектора \mathbf{q} электромагнитной волны. Через центральный проводник пропускались прямоугольные импульсы тока с амплитудой J_{\max} до 106 А и длительностью импульса τ_j от 9 до 1000 мкс. Частота повторения импульсов $f_{\text{повт}}$ изменялась от 10 до 300 Гц, при этом среднее по времени значение тока в образце не превышало 0.5 А.

Электромагнитные волны с частотами от 1.2 до 2.3 ГГц возбуждались генератором с мощностью не более 100 мкВт. В то же время мощность тока в образце в импульсе достигала 100 ВА. Таким образом, амплитуда высокочастотного электромагнитного (ЭМ) поля значительно меньше, чем поле тока и чем внешнее магнитное поле. Схема экспериментальной установки приведена в [8]. Измерялась амплитуда ЭМ волны, прошедшей отрезок линии с образцом. Образцы были вырезаны электроискровым способом из монокристаллов таким образом, что все их грани соответствовали кристаллографическим плоскостям типа (100). Сечение проводников меандра из алюминия 0.5×1 мм, он состоит из 15 периодов, соответственно у меандра из вольфрама 1×1 мм и 11 периодов. Отношение электросопротивлений образца вольфрама при $T = 4.2$ К и $T = 300$ К превышает 50 000.

В результате воздействия импульса тока амплитуда высокочастотного (ВЧ) радиоимпульса изменяется, а форма его огибающей становится непрямоугольной. При превышении пороговых значений силы тока импульса и магнитной индукции форма огибающей не воспроизводится от импульса к импульсу (рис. 1). Положение во времени начала импульса тока на этом рисунке указано стрелкой, длительность импульса тока $\tau_j = 50$ мкс значительно меньше длительности ВЧ импульса. Осциллограммы рис. 1 получены с помощью запоминающего осциллографа без изменения условий эксперимента. Амплитуда радиоимпульса, прошедшего линию с образцом, испытывает немонотонные неперіодические изменения во времени, причем масштабы этих изменений лежат в пределах от десятков микросекунд до секунд. На рис. 2 внизу изображена характерная временная зависимость амплитуды, полученная при пропускании импульсов тока с $J_{\max} = 47$ А, $\tau_j = 200$ мкс через меандр из алюминия. Частота волны $f = 2190$ МГц, магнитная индукция $B = 3$ Тл. Эта зависимость содержит участки относительно слабых и сильных резких изменений амплитуды. Каждому типу участков соответствует свой вид огибающей радиоимпульса.

Чтобы подтвердить хаотический характер колебаний амплитуды, был проведен эксперимент по изучению разбегания первоначально близких траекторий. С помощью двух стробоскопических преобразователей

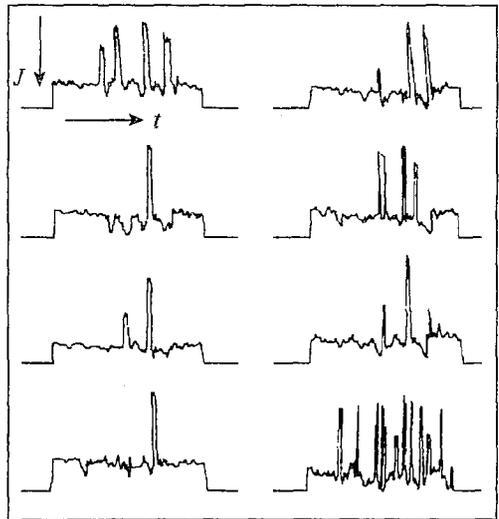


Рис. 1. Осциллограммы импульсов огибающей радиоимпульса волны, прошедшей линию с проводником из алюминия, $f = 2065$ МГц, $B = 6$ Тл, $T = 4.2$ К, $J_{\max} = 46$ А, $\tau_j = 50$ мкс, $\tau_{\text{вч}} = 1$

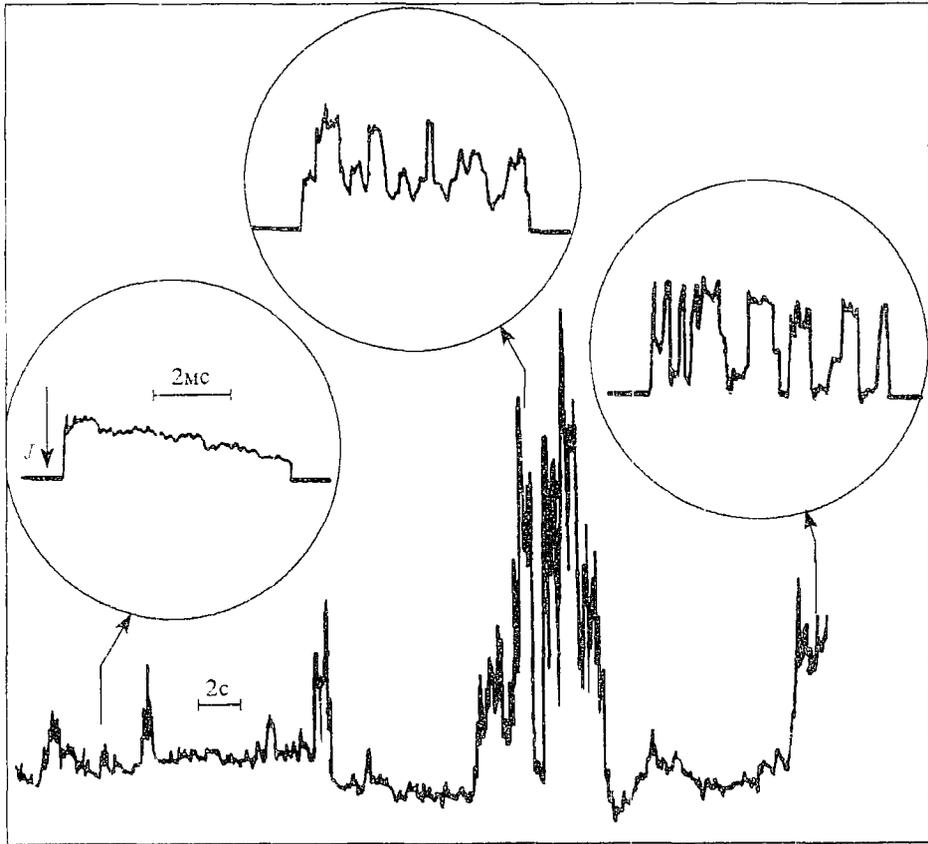


Рис. 2. Временная эволюция амплитуды волны и осциллограммы огибающих, $f = 2190$ МГц, $B = 3$ Тл, $T = 4.2$ К, $J_{\max} = 47$ А, $\tau_J = 200$ мкс, $\tau_{\text{вч}} = 6$ мс, $f_{\text{повт}} = 50$ Гц

измерялись амплитуды в двух близких точках огибающей. Положение первого строб-импульса указано стрелкой I на рис. 3. Второй отстоял от первого на время задержки 8 мкс. Сигнал с первого преобразователя подавался на X-пластины осциллографа, со второго - на Y-пластины. Годографы точки спустя несколько временных интервалов после начала измерений показаны на рис. 3, внизу.

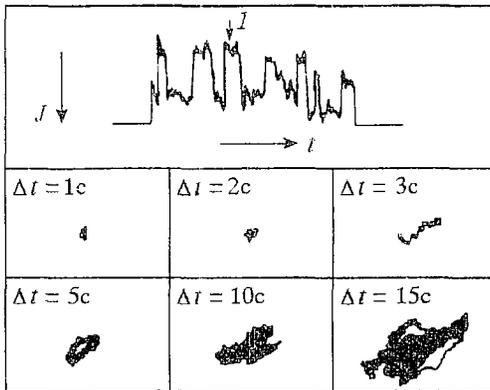


Рис. 3. Разбегание первоначально близких траекторий. Вверху - осциллограмма огибающей радиоимпульса, $f = 2068$ МГц, $B = 6$ Тл, $J_{\max} = 46$ А, $\tau_J = 100$ мкс, $\tau_{\text{вч}} = 2$ мс, $\tau_3 = 8$ мкс; внизу - годографы точки спустя время Δt после начала измерений

В работе [8] с помощью зонда, помещенного внутрь линии на расстояние $1/3$ ее длины от начала, было обнаружено, что форма огибающей радиоимпульсов прошедшего сигнала и зонда различна. Результаты дальнейшего изучения этого явления представлены на рис. 4. Здесь показаны три пары осциллограмм огибающих, измеренных на разных, хотя и достаточно близких частотах волн. В каждой паре осциллограмм верхняя - прошедший сигнал, нижняя - сигнал с зонда. Помимо несовпадения формы огибающих, можно еще заметить следующий факт. На осциллограммах рис. 4, б и в видны резкие изменения в первом случае на сигнале с зонда, а во втором случае на

прошедшем сигнале. Эти изменения соответствуют волнам переключения, когда скачком изменяется модуль коэффициента передачи отрезка линии. На положение участка осциллограммы с резким изменением амплитуды оказывают влияние как сила тока импульса, так и величина магнитной индукции. Наличие резких изменений лишь на одном из сигналов говорит о том, что в линии образуются по меньшей мере две области со значительно отличающимися значениями амплитуды ВЧ волны. Время существования таких областей достигает нескольких десятков микросекунд, что на несколько порядков больше времени прохождения линии бегущей высокочастотной волной. Положение границы между областями изменяется при изменении управляющих параметров и времени. Результаты этого эксперимента можно трактовать как появление автоволн в линии.

Своеобразное явление упорядочения наблюдалось в меандровой линии с проводником из вольфрама на частоте $f = 1486$ МГц. Подбором длительности импульса тока удалось добиться, что изменения амплитуды радиоимпульса стали периодическими. На рис. 5, а показаны осциллограммы импульса тока и огибающей радиоимпульса, на рис. 5, б - зависимость временного сдвига $\Delta\tau$ от числа периодов модуляции. Как видно, приведенная зависимость - это прямая линия. Таким образом, существует выделенный период модуляции. При изменении условий эксперимента, например, магнитной индукции, периодичность модуляции нарушается.

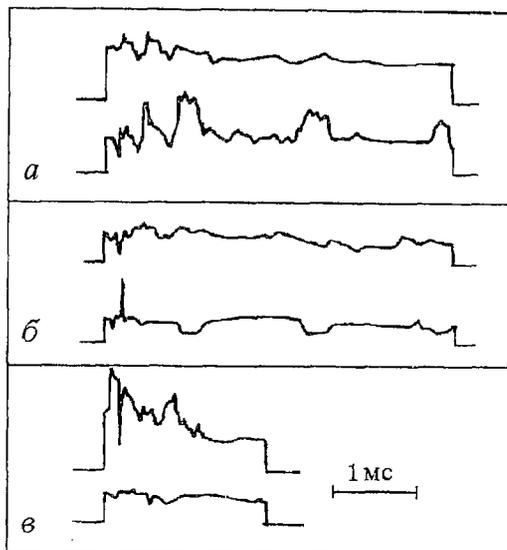


Рис. 4. Огибающая прошедшего линию сигнала (верхняя осциллограмма пары) и сигнала с зонда (нижняя осциллограмма), центральный проводник из алюминия: а - $f = 1519$ МГц, б - $f = 1530$ МГц, в - $f = 1542$ МГц; $B = 5$ Тл, $J_{\max} = 37$ А, $\tau_f = 120$ мкс

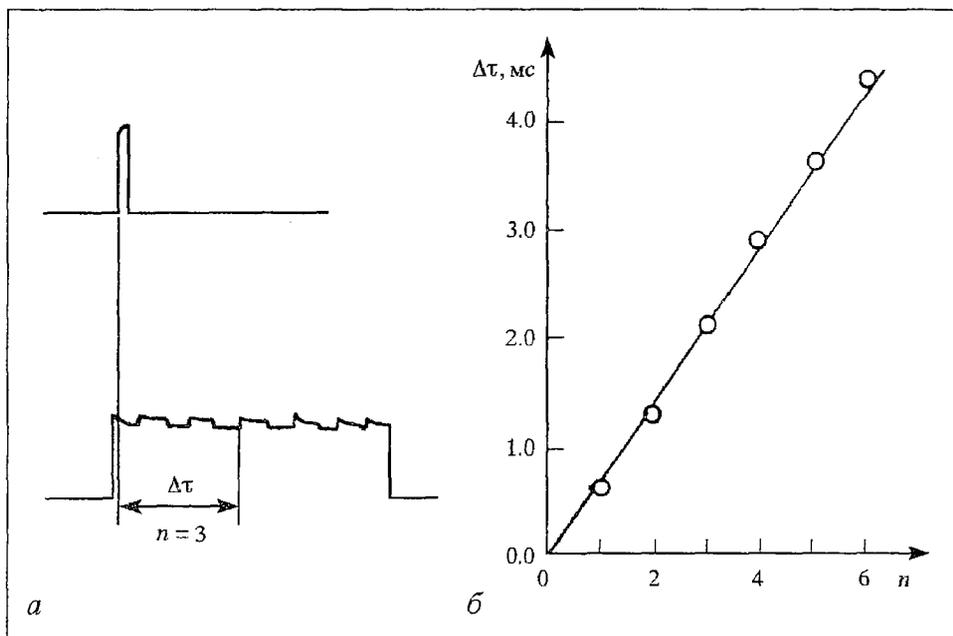


Рис. 5. Синхронизация колебаний амплитуды в линии с проводником из вольфрама, а) осциллограммы тока I и огибающей; б) зависимость временного сдвига $\Delta\tau$ от числа периодов n

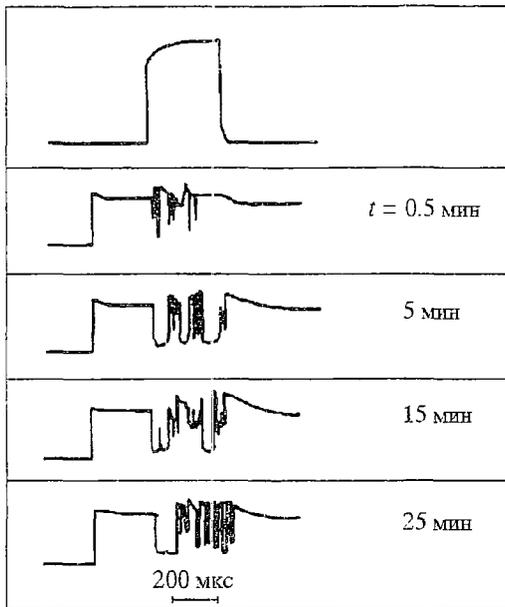


Рис. 6. Осциллограммы тока I и огибающих радиоимпульса спустя время Δt после включения импульсов тока. Центральный проводник из вольфрама

изменения амплитуды ЭМ волны указывают на наличие динамического хаоса. Во-первых, это сложный непериодический характер колебаний амплитуды (см. рис. 2). Во-вторых, спектральная плотность мощности таких колебаний непрерывна, как показано в [9]. В третьих, следует отметить реакцию системы на малое изменение параметров, например, порог явлений по току [7]. Кроме того, можно отметить изменение характера явлений при малом изменении частоты волн (см. рис. 4). Оценки старшего показателя Ляпунова из временной зависимости амплитуды, сделанные по методике [10], показали положительность этого параметра.

Механизм действия тока в полосковой или меандровой линии на ЭМ волны предложен в [9]. Изменение амплитуды есть результат изменения в расположении источников, возбуждающих систему. Роль сторонних источников играют области турбулентных токов, которые перемещают электроны из скин-слоя вглубь металла. О турбулентности в распространении ЭМ волны можно судить по существованию нескольких сильно отличающихся временных масштабов изменений ее амплитуды: от единиц микросекунд на рис. 3 до единиц секунд в [7].

В металле происходят электромагнитные процессы с разными частотами: ω - высокочастотной волны, ω_c - импульсов тока. Согласно [5], поле сильной электромагнитной волны (в нашем случае поле последовательности импульсов тока) ввиду пространственной неоднородности и нелинейности электропроводности металла испытывает изменения во времени с характерными частотами возмущений $\tilde{\omega}$. Частотные масштабы сильно отличаются друг от друга, $\tilde{\omega} \ll \omega_c \ll \omega$. Указанным частотам соответствуют наборы параметров описания в виде напряженностей магнитных полей \tilde{H} , H_c , H и пространственных масштабов локализации в металле $\tilde{\delta} \ll \delta_c \gg \delta$. Мы имеем дело с ВЧ волной малой амплитуды

$H \ll H_c$, \tilde{H} . На высокочастотные переменные оказывают воздействие как поля импульсов, так и поля возмущений. Ввиду малости амплитуды высокочастотной волны обратного воздействия не происходит. Поля возмущений создаются в

Трансформация формы огибающей не является следствием переходных процессов после включения импульсов тока. Так, время установления теплового режима не превышает двадцати секунд, в то время как эволюция огибающей продолжается и спустя десятки минут после включения импульсов тока (рис. 6). Можно заметить, что происходит процесс изменения распределения времен между переключениями. Это указывает на развитие явления во времени без изменения управляющих параметров.

Приведенные экспериментальные результаты представляют собой примеры нелинейного взаимодействия волн различных частот. Физической причиной нелинейности служит действие сильного магнитного поля волны или тока на траектории электронов в кристалле. В то же время неравновесность системы электронов в металле обусловлена электрическим полем, которое в металле невелико.

Отметим признаки, по которым

результате неустойчивости токовых состояний, созданных импульсами тока. В то же время в эффективное медленно меняющееся поле для волн с частотой ω , входят поля \tilde{H} .

Данные рис. 1, 4 говорят о наличии в системе волн переключения. В большинстве экспериментов моменты переключения амплитуды прошедшего сигнала случайны. Однако, подбором условий эксперимента удалось добиться синхронизации колебаний (см. рис. 5). Это говорит о возникновении колебательной моды с минимальным коэффициентом затухания. Она демонстрирует принцип подчинения мод [11] и определяет характер пространственно-временных структур. Результаты, представленные на рис. 4, говорят о реализации в системе стационарных диссипативных структур, поскольку на нижней паре осциллограмм виден импульс переключения на прошедшем сигнале и не виден на сигнале зонда. Как указано в [5,6], помещенный в магнитное поле металл, по которому протекает сильный ток, представляет собой систему со скрытым отрицательным дифференциальным сопротивлением r_d . Она описывается уравнением параболического типа для двухкомпонентной системы с диффузией. Роль компоненты с $r_d < 0$ играет группа электронов, «захваченных» магнитным полем импульса тока. У остальных электронов $r_d > 0$. Пространственный масштаб изменения положения захваченных электронов ограничен эффективной глубиной скин-слоя для импульсов тока δ_s . Соответствующий масштаб для остальных (объемных) электронов ограничен минимальным размером поперечного сечения проводника меандра p , $p \gg \delta_s$. Известно [12], что в двухкомпонентной системе, описываемой уравнением диффузии, при резком различии пространственных масштабов, связанных с компонентами, реализуются статические диссипативные структуры.

Суммируя полученные в статье результаты отметим, что в линии под действием импульса тока могут возникать по крайней мере две области с сильно отличающимися значениями амплитуды высокочастотного поля. Кроме того, возможно явление синхронизации колебаний. Таким образом, полученные экспериментальные результаты говорят о возникновении пространственной и временной когерентности переменных состояния распределенной системы, что указывает на присутствие элементов самоорганизации.

Библиографический список

1. Долгополов В.Т., Марголин Л.Я. Поверхностный импеданс висмута при больших амплитудах электромагнитных волн // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17, вып. 5. С. 233.
2. Волошин И.Ф., Кравченко С.В., Фишер Л.М. Стохастизация автоколебаний импеданса металла в «токовом состоянии» // Докл.АН СССР. 1986. Т. 287, № 1. С. 107.
3. Долгополов В.Т., Чупров П.Н. Недиффузионное проникновение низкочастотных электромагнитных волн в висмут // ЖЭТФ. 1982. Т. 83, вып. 6 (12). С. 2287.
4. Dolgoplov V.T., Chuprov P.N. Electrodynamical domains in metal plates // Solid State Communs. 1983. Vol. 48, № 2. P. 165.
5. Канер Э.А., Макаров Н.М., Юркевич И.В., Ямпольский В.А. Автоволновые структуры и метастабильность токовых состояний в металлах // ЖЭТФ. 1987. Т. 93, вып. 1(7). С. 274.
6. Канер Э.А., Макаров Н.М., Снапиро И.Б., Ямпольский В.А. Отрицательное дифференциальное сопротивление и расслоение тока в металлических пластинках // ЖЭТФ. 1985. Т. 88, вып. 4. С. 1310.
7. Ринкевич А.Б., Пономарева М.В., Устинов В.В. Нестационарные явления

и неустойчивость поверхностной волны при протекании тока // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49, вып. 6. С. 494.

8. *Ринкевич А.Б.* Фединг в периодической системе с током // РЭ. 1992. Т.37, № 8. С. 1524.

9. *Ринкевич А.Б.* Влияние тока в монокристалле вольфрама на электромагнитные волны // ЖТФ. 1994. Т. 64, вып. 1. С. 162.

10. *Wolf A., Swift J., Swinney H., Vastano J.* Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica D. 1985. Vol. 16, № 3. P. 285.

11. *Николис Дж.* Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 488 с.

12. *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 272 с.

*Институт физики металлов
УрО РАН*

*Поступила в редакцию 10.08.94
после переработки 13. 12. 94.*

SELFORGANIZATION ELEMENTS OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN MEANDER LINE UNDER CURRENT FLOW ACTION

A.B. Rinkevich

The experimental results of the electromagnetic waves propagation study were considered in the meander line. The central conductor was made from single crystal of tungsten or aluminum. Line was placed in magnetic field at low temperature. Under the action of the strong electric current pulses the deviation of the electromagnetic wave amplitude was observed speaking about the temporal and space coherence existence in the system.



Ринкевич Анатолий Брониславович - родился в 1950 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1973). Работает в Институте физики металлов Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, старшим научным сотрудником. Защитил кандидатскую диссертацию, посвященную взаимодействию упругих волн с электронами проводимости в металлах при низких температурах (1984). Основная область научных интересов в настоящее время - экспериментальное изучение высокочастотных электромагнитных волн в металлах и их нелинейного взаимодействия с электронами в металле. Автор более чем 40 научных публикаций.