

09; 12

© 1992

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МЕТАЛЛОМ
С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕА.Б. Р и н к е в и ч, М.В. П о н о м а р е в а,
В.В. У с т и н о в

Обнаружена генерация импульсов электромагнитных волн меандровой линией, изготовленной из чистого алюминия или вольфрама, под действием импульса тока. Эффект наблюдается при низких температурах и в сильном магнитном поле. Существует корреляция между эффектом генерации и нестационарными явлениями при распространении электромагнитных волн.

Протекание сильного электрического тока через металлы или полуметаллы сопровождается несколькими явлениями. Эти явления наблюдаются, как правило, при отклонении от линейности вольтамперной характеристики и вызываются различными причинами. Известен эффект генерации фононов носителями тока, дрейфующими со звуковыми скоростями [1, 2]. Группа явлений связана с влиянием магнитного поля тока на свойства среды. Это гальваномагнитная неустойчивость [3], турбулентное протекание тока [4]. В меандровой линии, помещенной в магнитное поле, при низкой температуре наблюдаются нестационарные явления и неустойчивости в распространении поверхностных электромагнитных волн [5] и генерация гармоник этих волн [6].

В этой работе сообщается о наблюдении эффекта генерации высокочастотных волн в меандровой линии в сходных с работами [5, 6] условиях. Генерация наблюдалась при дрейфовой скорости электронов, значительно меньшей, чем скорость звука и скорость электромагнитных замедленных волн.

Схема эксперимента следующая: через центральный проводник меандровой линии пропускается импульс тока. Магнитное поле индукцией B до 7 Тл приложено по оси системы. Электромагнитный сигнал с концов меандра через коаксиальные линии поступает на измерительный приемник П5-4Б. Измерительная ячейка, состоящая из проводника меандра, латунного экрана и системы фильтров, развязывающих высокочастотный тракт от цепи токового импульса; та же, что и в работах [5, 6]. По сравнению с [5] увеличено максимальное значение силы тока в импульсе до 106 А. Длительность токового импульса τ_y составляет несколько десятков мкс, период следования T_n — от десяти до ста мс. Центральный проводник меандра вырезан из монокристалла чистого алюминия так, что его проводники длиной 40 мм ориентированы вдоль осей типа $\langle 100 \rangle$ кристалла. Сечение проводников прямоугольное, размером 0.5х

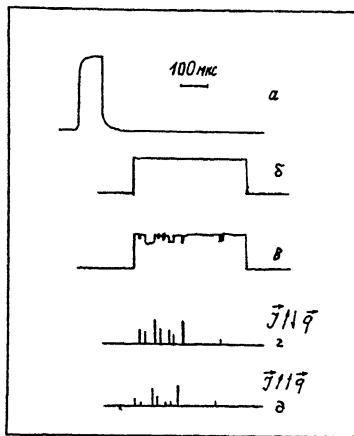


Рис. 1. Генерация СВЧ и нестационарные явления и неустойчивость в распространении электромагнитных волн. Импульс тока - (а); огибающая прошедшего сигнала с частотой $f = 1.2$ ГГц при $B=0$ (б) и $B=5$ Тл (в); импульсы генерации СВЧ на частоте $f = 1.2$ ГГц (г) и (д).

$\times 1$ мм. Период меандра 1.6 мм; меандровая линия содержит 15 периодов.

Алюминиевый проводник меандра соединялся с медными проводниками системы фильтров двумя способами. Контакт осуществлялся либо через промежуточные проводники из никелевой проволоки, приваренные к алюминию, либо с помощью индия марки ИНОО. Измерения выполнены при температуре 4.2 К.

Генерация импульсов высокочастотных электромагнитных волн наблюдалась во всем исследованном диапазоне частот от 1.2 до 2.2 ГГц. Генерация возникает как во время действия импульса тока, так и в последующие моменты времени. Огибающая амплитуды импульсов длительностью 1–10 мкс имеет вид экспоненциального спада, либо затухающей синусоиды, наложенной на экспоненциальный спад. Генерация имеет прерывистый характер, т. е. импульсы СВЧ генерируются не каждым токовым импульсом. При наибольших значениях силы тока и магнитной индукции генерируемая мощность достигает в импульсе $5 \cdot 10^{-9}$ Вт. Наибольшие значения амплитуды импульсов генерации соответствуют частотам 1.27 и 1.8 ГГц.

На рис. 1 показаны результаты эксперимента при максимальном значении силы тока $J_M = 40$ А. Осциллограмма „а“ показывает форму импульсов тока. На осциллограмме „г“ показаны импульсы амплитуды генерируемых колебаний СВЧ, зафиксированные на частоте $f = 1.2$ ГГц. На осциллограмме „д“ рис. 1 изображены импульсы генерации СВЧ, измеренные с другого вывода меандровой линии. Осциллограммы „г“ и „д“ отличаются друг от друга, с точки зрения условий эксперимента, различным взаимным расположением направлений тока и генерируемой волны.

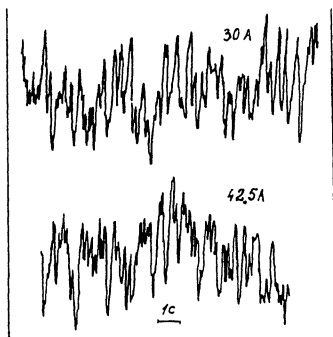


Рис. 2. Изменение во времени амплитуды импульсов СВЧ; $V=5.5 \text{ Тл}$, $f = 1,3 \text{ ПГц}$.

Существует корреляция между эффектом генерации и неустойчивостью и нестационарными явлениями в распространении электромагнитных волн. Осциллограммы „б“ и „в“ показывают огибающую амплитуды высокочастотного сигнала, прошедшего систему без магнитного поля („б“) и при $V=5 \text{ Тл}$ („в“). Первоначально прямоугольная форма огибающей при наложении магнитного поля искажается. Отдельные участки осциллограммы огибающей, отмеченные черным, в случае „в“ изменяются от импульса к импульсу. Аналогичные нестационарные явления и неустойчивость в распространении электромагнитных волн наблюдались в [5]. Сравнивая положение по времени особенностей прошедшего сигнала на осциллограмме „в“ и импульсов генерации „г“, можно отметить совпадение импульсов генерации с фронтами особенностей прошедшего сигнала. Это указывает на родственные причины этих явлений.

Генерация СВЧ подобно нестационарным явлениям и неустойчивостям в распространении волн имеет пороговые значения магнитной индукции и силы тока. Стохастический характер генерации иллюстрирует рис. 2, где приведены изменения во времени амплитуды импульсов СВЧ, измеренной в режиме линейного пикового детектирования. Как видно из рисунка, генерация возникает при значениях силы тока в импульсе свыше 20 А. При значительном превышении порогового значения тока наблюдаются неперiodические изменения амплитуды, а в области $J_M=25 \text{ А}$ реализуется режим с перемежаемостью. Подобный режим наблюдался при изучении неустойчивостей в распространении электромагнитной волны в этой системе [5] и в эффекте генерации гармоник [6].

Генерация вызывается периодическими импульсами тока, но количество и амплитуда импульсов СВЧ стохастически изменяются

во времени. Поэтому можно считать, что спектр излучения непрерывный, с максимумами, отстоящими друг от друга на расстояние, равное частоте повторения импульсов тока порядка 10–100 Гц. Генерация наблюдалась приемником с шириной полосы 4.5 МГц, значительно превышающей частоту повторения, что не позволяет выполнить подробное изучение спектра.

Явления генерации электромагнитных волн наблюдались и при воздействии импульса тока на меандровую линию, изготовленную из вольфрама. При этом проявлялись те же характерные особенности, что и в линии из алюминия.

Рассматривая возможные причины наблюдавшегося явления, следует учитывать, что эффекты генерации СВЧ и неустойчивости в распространении волн вызываются общей причиной. Так как, согласно [5], неустойчивости в распространении волн существуют лишь при температурах вблизи $T=4.2$ К, то поиск причин генерации нужно ограничить механизмами, возможными при низких температурах.

При протекании сильного тока через проводник может возникнуть неустойчивость вследствие возбуждения гальваномагнитной волны [7]. Этот вид неустойчивости наблюдался в висмуте в работе [3], где были зафиксированы частоты в несколько десятков и сотен Гц. В наших экспериментах зафиксирован электромагнитный сигнал с частотами около 10^9 Гц. Кроме того, теория гальваномагнитных волн предсказывает возбуждение монохроматической волны [7], а нами наблюдался сигнал с широким спектром. Поэтому нет оснований утверждать, что эффект генерации СВЧ обусловлен высокочастотной гальваномагнитной волной.

Хорошо известно явление генерации СВЧ при действии тока на полупроводник. По механизму эффекта Ганна в образце возникает и затем дрейфует к границе образца домен сильного электрического поля. Тогда статически вольт-амперная характеристика полупроводника имеет падающий участок, чего не было обнаружено на нашем металлическом образце. В [8] рассмотрено влияние магнитного поля на процессы генерации СВЧ в антимониде индия. Там показано, что в области контактов в сильном магнитном поле возникает неоднородное распределение тока и электрического поля, что приводит к шумоподобной генерации СВЧ.

Неоднородное распределение тока реализуется в нашем эксперименте из-за скин-эффекта для импульса тока в металле и наличии сильного магнитного поля. Генерация колебаний возможна в этом случае при расслоении тока и возникновении в образце пространственных областей [9], где возникает отрицательное дифференциальное сопротивление, даже если весь образец в целом имеет монотонную вольтамперную характеристику.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] E s a k i L. // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 8.
N 1. P. 4.

- [2] Виткалов С.А., Гантмахер В.Ф., Левинев Г.И. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. В. 6. С. 2233-2240.
- [3] Копылов В.Н. // ФТТ. 1981. Т. 23. В. 7. С. 1948-1955.
- [4] Захарченко С.И., Кравченко С.В., Фишер Л.М. XXV Всесоюз. совещ. по физике низких температур 1988. Л. Э2. С. 5-6.
- [5] Ринкевич А.Б., Пономарева М.В., Устинов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. В. 9. С. 494-497.
- [6] Ринкевич А.Б., Устинов В.В., Пономарева М.В. // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. В. 4. С. 647-652.
- [7] Гуревич Л.Э., Иоффе И.В. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 6. С. 2047-2056.
- [8] Thompson A.H., Kino G.S. // IBM. J. Res. Develop. 1969. V. 13. N 5. P. 616.
- [9] Кернер Б.С., Осипов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. В. 2. С. 122-126.

Поступило в Редакцию

26 февраля 1992 г.

В окончательной редакции

с 3 июля 1992 г.