

05;12

Моделирование размыкания тока при фазовом переходе металл–изолятор

© Ю.Б. Кудасов, В.Н. Павлов

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ, Саров

Поступило в Редакцию 15 декабря 1999 г.

Выполнено численное одномерное моделирование процесса нелинейной диффузии магнитного поля в экран, изготовленный из твердого раствора $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$, и переключения тока из экрана в нагрузку при фазовом переходе металл–изолятор. Показано, что возможно эффективное обострение фронта импульса тока в нагрузке.

В работе [1] была разработана одномерная модель диффузии магнитного поля в вещество, в котором происходит фазовый переход металл–изолятор под действием джоулевого разогрева. В качестве модельного вещества использовался твердый раствор $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$. Явление нелинейной диффузии может быть использовано в мощных импульсных размыкателях тока [2]. В простейшем варианте такого устройства полость источника тока отделена от полости нагрузки экраном, через который происходит нелинейная диффузия магнитного поля.

В работе [1] были найдены аналитические решения модели в случае стационарной диффузии в неограниченной среде, однако для практического применения процесса размыкания тока важно исследовать влияние формы импульсов тока (магнитного поля) и границ в экране конечной ширины. Такой анализ может быть выполнен только численно. Предположим, что имеется источник тока, подсоединенный к полосковой линии (рис. 1). Линия замыкается прямоугольным экраном, изготовленным из твердого раствора $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$. Состав раствора выбирается так, чтобы при разогреве твердого раствора примерно на 100 К от начальной (комнатной) температуры происходил фазовый переход металл–изолятор, т.е. $x \approx 0.0055$. За экраном к полосковой линии подключается $R-L$ нагрузка. Для простых предварительных оценок иногда удобно представить распространение токового импульса в экране как распространение волны в $R-L$ линии с распределенными параметрами с переменной проводимостью (рис. 1).

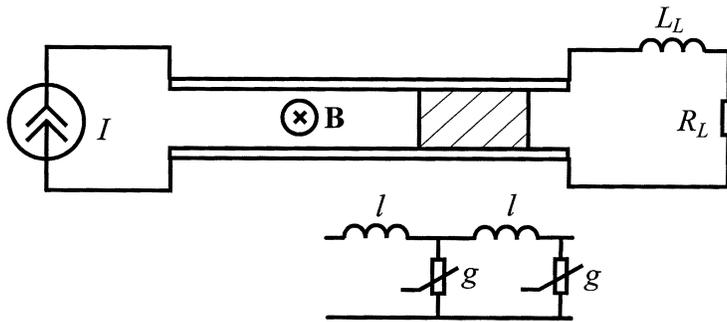


Рис. 1. Одномерная модель размыкателя тока: I — источник тока, L_L и R_L — индуктивность и сопротивление нагрузки, l и g — погонные индуктивность и проводимость экрана (заштрихован).

Пренебрегая краевыми эффектами, связанными с конечной шириной полоска и возможными неустойчивостями фазовой границы [3], можно рассматривать процесс переключения тока из полоска в нагрузку как нелинейную одномерную диффузию магнитного поля через экран. Магнитное поле считаем зависящим только от координаты x и от времени. Запишем уравнение диффузии магнитного поля \mathbf{B} в экран как [1]

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \text{rot}(\nu_m \text{rot} \mathbf{B}), \quad (1)$$

где $\nu_m = c^2/4\pi\sigma$ — магнитная вязкость, σ — проводимость. В работе [1] показано, что число Рейнольдса для характерных значений длительности импульса порядка нескольких микросекунд мало. Поэтому первым членом в правой части (1), связанным с переносом вещества, можно пренебречь:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_m \frac{\partial B}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) написано в скалярной форме, так как у нас имеется только одна, перпендикулярная плоскости рис. 1, компонента индукции магнитного поля. Джоулева теплота, поглощенная в экране, определяется выражением

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\nu_m}{4\pi} (\nabla B)^2. \quad (3)$$

Для твердого раствора $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$ мы использовали следующую модельную зависимость проводимости от поглощенной теплоты. При $Q < 350 \text{ J/cm}^3 \sigma = 10^3 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$, на интервале от 350 до 357 J/cm^3 , σ линейно спадает до значения $10 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$, далее проводимость остается постоянной. Величине 7 J/cm^3 соответствует скрытая теплота перехода. Все остальные параметры взяты из работы [1]. Для характерных времен порядка нескольких десятков микросекунд можно пренебречь всеми видами переноса тепла в экране [1].

Уравнения (2), (3) и модельная зависимость $\sigma(Q)$ образуют систему для исследования нестационарной диффузии в экран. Начальное условие для решения уравнения (1): $B(x) = 0$. Граничное условие на передней границе экрана — магнитное поле (ток), создаваемое источником тока в полоске. Граничное условие на задней границе экрана — связь магнитного поля и его производных по координате и времени — определялось нагрузкой. Основной проблемой в численном расчете диффузии является резкое изменение проводимости на узком интервале по Q . Величина ∇B пропорциональна плотности тока в экране. В точке фазового перехода плотность тока резко изменяется, образуется особенность типа разрыва. По этой причине преобразуем уравнение (3) к интегральному виду

$$\int_0^Q \nu_m(q) dq = \frac{c^2}{4\pi} \int_0^t E^2 d\tau, \quad (4)$$

где $E = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla B$ — напряженность электрического поля. Поскольку зависимость $\nu_m(Q)$ известна, левая часть выражения (4) — тоже известная однозначная функция $f(Q)$. Тогда перед началом расчета диффузии можно вычислить обратную ей функцию $g\{f[Q(x, t)]\} = \nu_m(x, t)$. Тогда магнитную вязкость можно вычислять из уравнения

$$\nu_m(x, t) = g \left[\frac{c^2}{4\pi} \int_0^t E^2 d\tau \right]. \quad (5)$$

Заметим, что в отличие от тока напряженность электрического поля на фазовой границе металл–изолятор непрерывна, поэтому численное решение уравнений (2) и (5) не вызывает затруднений.

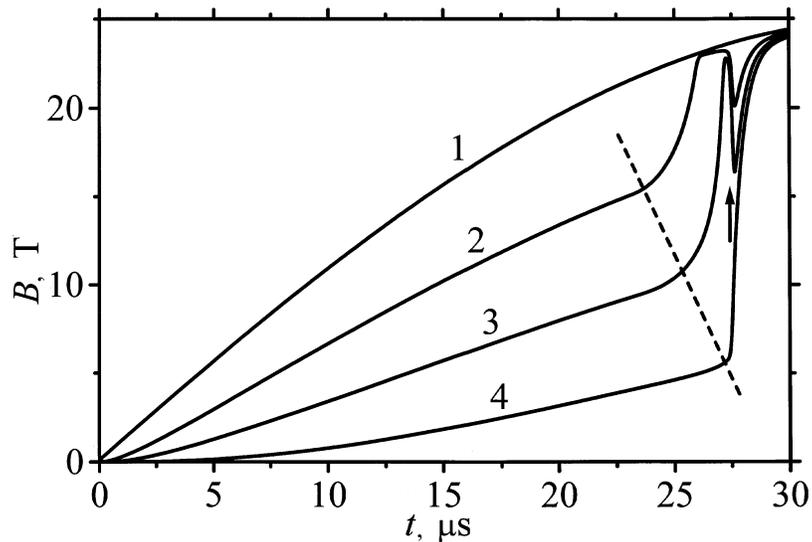


Рис. 2. Диффузия магнитного поля через экран. Магнитное поле на передней границе экрана (1), 1/3 и 2/3 глубины экрана (2, 3) и магнитное поле на задней границе экрана (4) для нагрузки $L_L = 38 \text{ нН/см}$ и $R_L = 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$ (38 нН и $10^{-3} \Omega$, если выбрать ширину полоска 1 см.)

Нами исследовались импульсы тока (магнитного поля) двух типов: четверть периода синусоиды — типичный импульс при разряде конденсаторной батареи и степенное нарастание $B \propto 1/(t - t_0)$ — характерный импульс магнитокумулятивного генератора типа МК-2. В последнем случае производная внешнего магнитного поля сильно изменяется в течение импульса, поэтому мы использовали переменный шаг по времени. Характер обострения импульса в обоих случаях был примерно одинаковый. На рис. 2 показано расчетное магнитное поле в различных сечениях экрана: 1 — на передней границе — пропорционально току источника; 4 — на задней стенке границы — пропорционально току нагрузки; 2, 3 — в сечениях 1/3 и 2/3 толщины соответственно. Пунктирная линия показывает движение фазовой границы металл–изолятор. Видно, что в нагрузке формируется импульс тока с существенно обостренным фронтом.

Характер нагрузки существенно влияет на форму импульса тока в нагрузке. Если нагрузка низкоомная и низкоиндуктивная, т.е. близка к короткому замыканию, то при выходе токовой волны на заднюю границу экрана нагрузка шунтирует экран. В результате волна замедляется, а импульс тока в нагрузке сглаживается. В случае высокоомной или высокоиндуктивной нагрузки (рис. 2) при достижении токовой волны задней границы начинает резко возрастать напряжение на полоске и, несмотря на то что экран находится уже в высокоомном состоянии, в нем снова начинает протекать значительный ток. Поэтому при выходе токовой волны на заднюю границу экрана формируется особенность, отмеченная стрелкой на рис. 2. Этот эффект в некотором смысле аналогичен формированию отраженной волны в линейных цепях с распределенными параметрами. В нашем случае цепь, однако, существенно нелинейная. Примерные условия согласования экрана и нагрузки можно определить следующим образом. В экране вместе с фазовым переходом движется токовая волна шириной Δx . Ее легко оценить, зная скорость движения фазовой границы [1]. Тогда оптимальная нагрузка будет иметь следующие примерные значения: $L_L = \Delta x l$, $R_L = \Delta x / g$, где l и g — погонные индуктивность и проводимость экрана как длинной линии (рис. 1).

Работа выполнена в рамках проекта № 829 Международного научно-технического центра.

Авторы признательны проф. Дж. Бруксу и др., В. Левису за неоценимую поддержку.

Список литературы

- [1] Кудасов Ю.Б. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 12. С. 43.
- [2] Кудасов Ю.Б. / Патент РФ 2121725 МПК 6Н01F7/06, 6Н01Н36/00. 1998.
- [3] Кудасов Ю.Б., Макаров И.В. Развитие неустойчивости при движении фазовой границы металл-изолятор. Международная конференция "Гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивания сжимаемых сред". Сб. аннотаций. С.-Петербург, 2-7 июля 1999. С. 61.