

05;09;12

Особенности высокочастотного поглощения лантан-стронциевого манганита в диапазоне от 2 до 30 МГц

© В.А. Березин, К.В. Багинский, В.А. Тулин,
Д.А. Шулятев, Я.М. Муковский

Институт проблем технологии микроэлектроники РАН,
Черноголовка, Московская обл.
E-mail: berezin@ipmt-hpm.ac.ru, tulin@ipmt-hpm.ac.ru
Московский институт стали и сплавов

Поступило в Редакцию 11 августа 2000 г.

Исследован ВЧ отклик монокристаллов $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ в частотном диапазоне от 2 до 30 МГц магнитном поле. Показано, что основной вклад в ВЧ отклик в этом диапазоне частот связан с гистерезисными потерями. Обнаружена аномалия ВЧ поглощения, зависящая от частоты, имеющая, по нашему мнению, релаксационное происхождение. Характерное время релаксации в области аномалии больше 10^{-7} с. Полевые зависимости ВЧ поглощения имеют резкий спад в области поля насыщения, что позволяет использовать данный материал в качестве датчиков магнитного поля и температуры.

Большое количество работ, вышедших из печати за последние годы и посвященных изучению манганитов, вызвано в первую очередь возможным применением таких материалов в качестве датчиков. Авторы большинства работ использовали для изучения колоссального магнито-сопротивления измерения на постоянном токе. Известные нам работы по высокочастотному поведению этого класса веществ в первую очередь преследуют другие цели и в основном сводятся к изучению ферро- и парамагнитного резонанса в СВЧ диапазоне. Однако практическое применение датчиков зачастую требует знаний о поведении данных материалов при более низких частотах (например, несколько десятков мегагерц для магниторезистивных головок). Кроме того, крайне привлекательным выглядит возможность контролировать состояние датчика бесконтактным методом, что достаточно просто реализуется в радиочастотном диапазоне. Для того чтобы осветить эту менее изученную сторону поведения манганитов, нами были проведены измерения от-

клика $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ монокристаллов на облучение высокочастотным магнитным полем в диапазоне от 2 до 30 МГц.

Образцы представляли собой диски диаметром 2.8 мм и толщиной 0.1 мм. Кристаллографическая ось (110) с точностью до 5 градусов была перпендикулярна плоскости диска. Образец помещался в спиральную катушку диаметром 6 мм и длиной ~ 12 мм, содержащую несколько десятков витков медного провода так, что плоскость диска была вертикальна и параллельна оси катушки. LC-контур (добротность ~ 60) состоял из этой катушки и присоединенной через коаксиал параллельной емкости. Варьируя величину емкости, можно было изменять резонансную частоту контура в необходимых пределах. Размер катушки (коэффициент заполнения) подбирался таким образом, чтобы полное изменение добротности резонатора, вызванное поглощением ВЧ мощности в образце в процессе измерений, не превышало 30%. В конечном варианте коэффициент заполнения составлял величину около $2 \cdot 10^{-3}$. При выполнении этого условия можно считать, что изменение высоты резонансной кривой пропорционально изменению ВЧ поглощения в образце [1]. Через небольшие емкости (емкости связи) LC-контур возбуждался генератором качающейся частоты и связывался с пиковым детектором, сигнал с которого был пропорционален потерям в образце. Амплитуда ВЧ магнитного поля в катушке была порядка 0.1 Ое. Создаваемое электромагнитом внешнее магнитное поле лежало в горизонтальной плоскости. Электромагнит мог поворачиваться в этой плоскости.

Нами были проведены измерения ВЧ поглощения в зависимости от внешнего магнитного поля и температуры. На рис. 1 представлены полевые зависимости поглощения на частоте 24 МГц при комнатной температуре для различных направлений внешнего магнитного поля относительно плоскости образца. Угол отсчитывается от нормали к плоскости образца. Хорошо видно, что довольно большое отклонение направления внешнего магнитного поля от параллельного плоскости образца не оказывает заметного влияния на полевую зависимость ВЧ потерь (не требуется точной юстировки параллельной ориентации). Кроме стандартного смещения кривой из-за действия размагничивающих полей, на зависимостях проявились две особенности. Это рост поглощения на начальном участке при увеличении магнитного поля, постепенно уплощающийся при приближении направления поля к нормали плоскости образца, и заметный излом при направлении магнитного поля, близком к нормали. По-видимому, этот излом связан

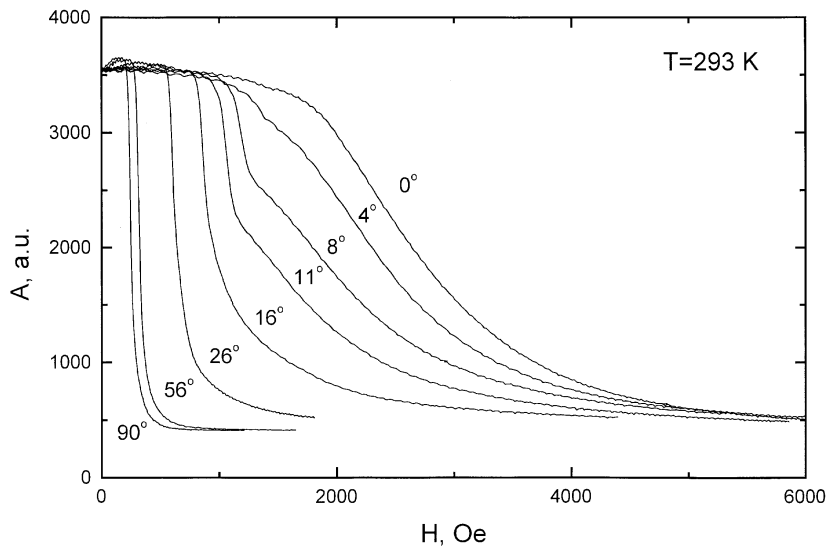


Рис. 1. Полевые зависимости ВЧ поглощения монокристалла лантан-стронциевого манганита на частоте 24 МГц при различных направлениях внешнего магнитного поля относительно плоскости образца при $T = 293$ К. Указан угол между нормалью к плоскости образца и направлением магнитного поля.

с изменением преимущественного направления намагниченности от лежащего в плоскости образца к перпендикулярному.

На рис. 2 показаны зависимости ВЧ поглощения на частоте 24 МГц от параллельного плоскости образца магнитного поля при изменении температуры. Характеристики измерительной системы в этом температурном интервале практически постоянны, и все изменения связаны с изменением свойств образца в достаточно узком температурном интервале вблизи точки Кюри. Температура Кюри для данного образца приблизительно равна 305 К. Необходимо отметить, что форма кривых коренным образом отличается от полевых зависимостей сопротивления на постоянном токе.

На рис. 3 приведен набор аналогичных полевых зависимостей, снятых при температуре 288 К на разных частотах. Кривые для большей наглядности нормированы по высоте таким образом, чтобы величины поглощения для всех кривых в нулевом поле и в больших полях

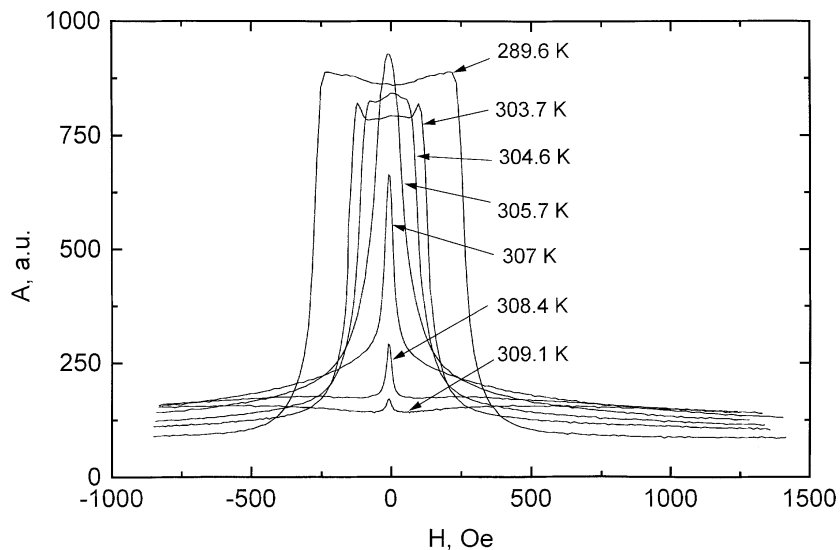


Рис. 2. Зависимости ВЧ поглощения монокристалла лантан-стронциевого манганита на частоте 24 МГц от параллельного плоскости образца магнитного поля при различных температурах.

совпадали. Хорошо видно, что максимум поглощения, отмеченный при описании рис. 1 и проявляющийся при более высоких температурах на рис. 2 (кривая 303.7 К), имеет ярко выраженную частотную зависимость.

Перейдем теперь к обсуждению полученных результатов. Как известно, возможны два механизма потерь в ферромагнетике при воздействии на него ВЧ поля. Первый связан с протеканием по образцу индуцированных ВЧ полей токов, и величина потерь зависит непосредственно от проводимости (магнитосопротивления) образца. Причиной второго является воздействие ВЧ магнитного поля на намагниченность образца, вызывающее ее периодическое изменение и приводящее к диссипации энергии (гистерезисные потери в области намагничивания). Обсудим каждый из этих механизмов применительно к нашему случаю. Известно, что воздействие внешнего магнитного поля на проводимость манганитов очень велико и было изучено достаточно подробно (см., например, [2,3]). Не будем вдаваться в причины такого поведения, отметим только, что

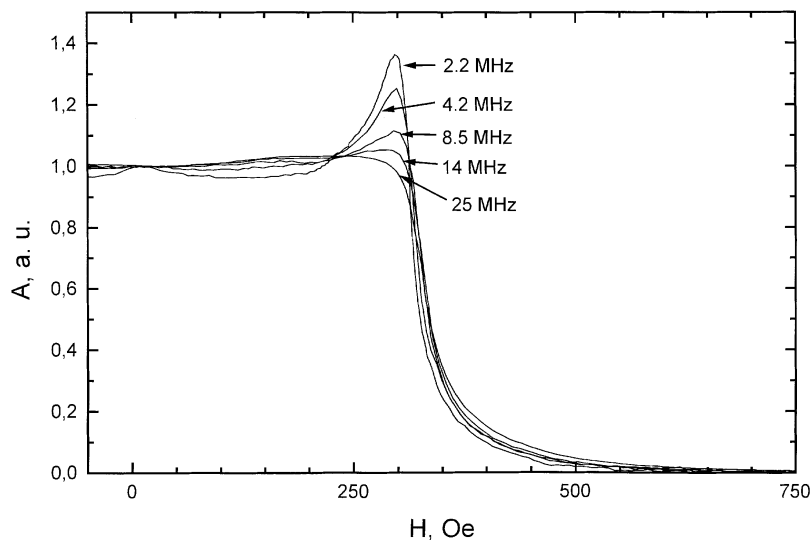


Рис. 3. Полевые зависимости ВЧ поглощения при температуре 288 К на разных частотах. Кривые нормированы по высоте таким образом, чтобы величины поглощения для всех кривых в нулевом поле и в больших полях совпадали.

для монокристаллов манганитов при температурах в области температуры Кюри характерно монотонное уменьшение сопротивления с увеличением магнитного поля, продолжающееся до десятков килоэрстед. Однако наблюдаемая нами картина сильно отличается от обычно характерной для измерений на постоянном токе "колоссального" магнитосопротивления [4]. Мы видим (рис. 2, кривая 289.6 К) достаточно резкое уменьшение ВЧ поглощения в полях ~ 250 Ое, при этом падение поглощения при дальнейшем увеличении поля крайне мало. Такое поведение говорит о том, что основной вклад в изменение ВЧ поглощения вносит не магнитосопротивление, а другой механизм.

Рассмотрим подробнее механизм потерь, связанный с перемагничиванием образца внешним ВЧ полем. На низких частотах намагниченность образца "равновесно" следует за изменением переменного магнитного поля и соответственно изменяется согласно частной петле гистерезиса. Величина потерь при этом зависит от амплитуды и частоты переменного и величины постоянного магнитных полей (потери про-

порциональны площади частной петли гистерезиса). При увеличении магнитного поля выше поля насыщения H_s площадь частной петли гистерезиса уменьшится до нуля (область парапроцесса) и соответственно должны уменьшиться ВЧ потери. Полевая зависимость ВЧ потерь будет определяться видом полной петли гистерезиса. Для образца нашего состава характерна узкая петля гистерезиса с практически линейным ростом намагниченности с увеличением внешнего поля и с резким выходом на насыщение [5]. Такая картина качественно согласуется с тем, что наблюдается в эксперименте при частотах ВЧ поля выше 10 МГц. Однако для объяснения максимума поглощения на полевой зависимости необходимо вспомнить, что процесс намагничивания ферромагнетиков определяется двумя механизмами: движением доменных границ и вращением намагниченности в доменах, при этом реакция намагниченности на внешнее воздействие не является мгновенной. Процессы движения доменных границ происходят достаточно быстро. Характерное время в этом случае достаточно короткое при комнатной температуре, так что выполняется условие $\omega\tau \ll 1$, где ω — частота внешнего воздействия. Поглощение, соответствующее по форме отклику на частотах выше 10 МГц (рис. 3), наблюдается даже на частоте 10 GHz.

Заканчивается кривая намагничивания ферромагнетика обычно процессами вращения намагниченности в областях, которые не могут перемагнититься за счет движения доменных стенок. По-видимому, этот процесс более медленный. Скорость изменения намагниченности можно охарактеризовать временем релаксации, в течение которого магнитная система приходит в равновесие с внешними условиями [6]. При увеличении частоты внешнего переменного поля мгновенное значение намагниченности образца начинает отставать по фазе от равновесного значения, что приводит к дополнительным потерям. При $\omega\tau \sim 1$ эти потери достигают максимума (здесь τ — время релаксации, ω — частота ВЧ поля). Дальнейшее увеличение частоты приведет к уменьшению дополнительных потерь, поскольку данный механизм перемагничивания не сможет отслеживать внешние изменения с необходимой скоростью и амплитуда изменения намагниченности будет падать. На основании этого достаточно просто объяснить возникновение максимума ВЧ поглощения на полевой зависимости для частот ниже 10 МГц. Такой максимум должен проявляться на полевой зависимости ВЧ поглощения, когда время релаксации намагниченности зависит от величины магнитного поля, в нашем случае из-за различных механизмов намагничивания. Наличие такого максимума указывает на то, что для механизма вращения

намагниченности поглощение больше по величине и частота релаксации гораздо ниже, чем для движения доменных границ. Для нашей наименьшей частоты 2 МГц мы еще не достигли максимума поглощения, т. е. $\tau_{вр}$ больше 10^{-7} с при комнатной температуре. Проявление аналогичного максимума при более высокой температуре на частоте 24 МГц отражает температурную зависимость времени релаксации.

Таким образом, полевая зависимость ВЧ отклика в радиочастотном диапазоне $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ монокристаллов определяется магнитосопротивлением и гистерезисными потерями. Вклад магнитосопротивления в ВЧ поглощение хорошо заметен вблизи температуры Кюри, где магнитосопротивление максимально (рис. 2, кривые 304.6 К, 303.7 К). Там можно и оценить этот вклад в общие ВЧ потери по наклону зависимости поглощения от магнитного поля в области больших полей ($H > H_s$). Этот вклад составляет примерно двадцатую часть от общего поглощения в области полей намагничивания ($H < H_s$). В магнитных полях, меньших H_s , гистерезисные потери вносят основной вклад в ВЧ отклик. При этом 50% от всего интервала изменения ВЧ поглощения достигается в диапазоне 20 Ое около H_s . Наблюдающаяся немонотонность связана с различными механизмами перемещения доменов в разных магнитных полях, определяющими величину поглощения и частоту релаксации. Величина магнитного поля, при которой происходит резкое изменение поглощения, также сильно зависит от температуры (в области комнатных температур скорость изменения ~ 20 Ое/град). Такое поведение позволяет использовать данные материалы в качестве датчиков магнитного поля и температуры.

Список литературы

- [1] Березин В.А., Ильичев Е.В., Тулин В.А. // ЖЭТФ. 1994. Т. 105. В. 1. С. 207–214.
- [2] Нагаев Э.Л. // УФН. 1996. Т. 166. № 8. С. 833–858.
- [3] Горьков Л.П. // УФН. 1998. Т. 168. № 6. С. 665–671.
- [4] Urusibara A., Moritomo Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. // Phys. Rev. 1995. B51. N 20. P. 14 103–14 109.
- [5] Горбенко О.Ю., Демин Р.В., Кауль А.Р., Королева Р.И., Шимчак Р. // ФТТ. 1998. Т. 40. № 2. С. 290–294.
- [6] Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.