

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОПОЛЕВЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2007 г. П. Д. Ким, Д. Л. Халяпин, Л. Е. Быкова

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

Поступила в редакцию 31.10.2006 г.

Предложен простой метод измерения магнитосопротивления в слабых полях, основанный на использовании низкочастотного переменного магнитного поля. Особенностью метода является непосредственное измерение разности сопротивлений ΔR исследуемого образца в поле и в отсутствие поля, что позволяет значительно повысить чувствительность измерений. Описана автоматизированная установка для измерения температурных зависимостей магнитосопротивления пленочных металлических образцов с чувствительностью по ΔR до 10^{-7} Ом. Проведены исследования температурных зависимостей магнитосопротивления тонкопленочных образцов нанокристаллических сплавов Co–Cu в малых магнитных полях и диапазоне температур 77–300 К.

PACS: 73.43.Qt; 84.37.+q

Для измерения магнитосопротивления MR пленочных материалов чаще всего применяется четырехзондовый метод постоянного тока. При этом отдельно измеряется сопротивление образца в магнитном поле R_H и его сопротивление в отсутствие поля R_0 , а величина магнитосопротивления вычисляется как

$$MR = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_0 - R_H}{R_0}.$$

Непосредственно измеряемыми величинами являются ток через образец I_R и падение напряжения на образце U_R . Данный способ измерения электросопротивления удается сравнительно легко автоматизировать, поэтому именно он, как правило, используется в автоматизированных установках измерения электросопротивления. Однако в ряде случаев подобный простой метод определения величины магнитосопротивления встречает определенные трудности. Так, при измерениях сопротивления плотность тока через образец должна быть ограничена, чтобы обеспечить неизменность свойств образца в процессе измерений. При малой толщине пленочного образца соблюдение данного условия ведет к ограничению I_R . Реально это означает, что для пленки толщиной ≤ 0.1 мкм величина I_R должна составлять ≤ 1 мА. Поскольку собственное сопротивление металлического образца может быть малым (≤ 1 Ом), падение напряжения на образце U_R при этом составляет десятки–сотни микровольт. Если значение MR мало, то разность падений напряжения на образце в поле

U_{R_H} и в отсутствие поля U_{R_0} может уменьшиться до единиц нановольт.

Нами предлагается способ измерения магнитосопротивления в слабых магнитных полях с высокой чувствительностью. Образец, через который пропускается постоянный ток I_R , помещается в переменное магнитное поле H_{\sim} , напряженность которого меняется по синусоидальному закону $H_{\sim} = H_m \cos \omega t$ с малой частотой ω . При увеличении напряженности поля от $H = 0$ до $H = H_m$ сопротивление образца R увеличивается (либо уменьшается, в зависимости от знака магнитосопротивления) от R_0 до R_{H_m} . При изменении напряженности магнитного поля до $H = -H_m$ благодаря четности магниторезистивного эффекта [1] сопротивление образца вновь становится равным R_{H_m} . В результате падение напряжения на образце U_R оказывается модулированным на удвоенной частоте внешнего поля 2ω : $U_R = U_{\text{const}} + U_{\sim}$, причем переменная составляющая U_{\sim} пропорциональна изменению сопротивления образца в поле H_m . Измеряя величину U_{\sim} с помощью селективного нановольтметра, настроенного на частоту 2ω , и зная величину I_R , можно определить изменение сопротивления $\Delta R = R_0 - R_{H_m}$. При этом величина R_0 в абсолютном значении измеряется обычными методами. Описанный способ измерения MR обладает высокой чувствительностью к измерению ΔR в слабых полях, поскольку чувствительность в данном случае будет определяться чувствительностью используемого нановольтметра переменного тока,

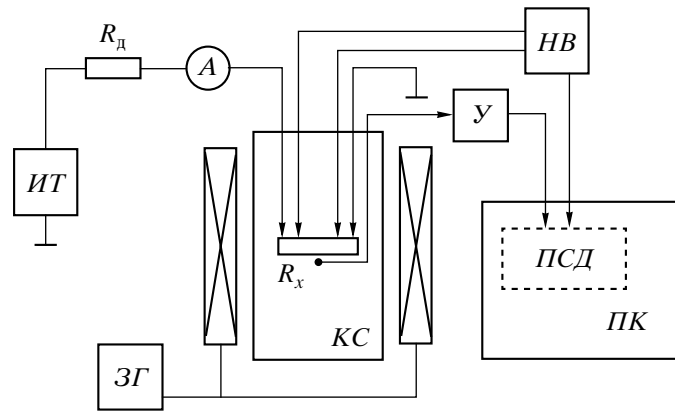


Рис. 1. Блок-схема установки. ИТ – источник тока, ЗГ – звуковой генератор, НВ – нановольтметр, А – амперметр, У – высокоточный усилитель, ПСД – плата сбора данных, ПК – персональный компьютер, КС – азотный криостат.

и позволяет с высокой точностью измерять величину MR без высокоточного измерения абсолютных значений R_0 (и R_H).

Предлагаемая методика имеет определенные ограничения применимости: при исследовании магнитных материалов с доменной структурой низкочастотное перемагничивание может вызвать изменения ее структуры, связанные с движением доменных границ (д.г.) либо возникновением новых/исчезновением старых д.г. Поскольку рассеяние электронов на д.г. отличается от рассеяния в глубине домена, данные эффекты вносят свой вклад в сопротивление образца и, следовательно, влияют на измеряемую описанным образом величину MR . Для тонкопленочных материалов, в которых формируется однородная по толщине пленки доменная структура, эффекта движения д.г. можно избежать, прикладывая переменное магнитное поле по нормали к плоскости пленки. В этом случае малое по величине магнитное поле, направленное перпендикулярно векторам намагниченности каждого домена, не сможет вызвать движения д.г. или других изменений в доменной структуре, а приведет лишь к небольшому повороту вектора намагниченности. Однако подобная геометрия эксперимента имеет некоторые особенности: возможности исследователя ограничиваются изучением только поперечного эффекта и эффективное поле в пленке уменьшается на величину, связанную с размагничивающим полем в пленке, что необходимо учитывать для правильной интерпретации получаемых результатов. Для материалов, не имеющих доменной структуры, например гранулированных металлических структур, данный метод представляется применимым без каких-либо ограничений.

На основе описанной методики нами была разработана и использована для исследования температурных зависимостей магнитосопротивления нанокристаллических сплавов $Co-Cu$ автоматизированная установка. Блок-схема установки приведена

на рис. 1. Переменное магнитное поле низкой частоты (в эксперименте $f = 37$ Гц) создавалось кольцами Гельмгольца, подключенными к звуковому генератору ЗГ. На токовые контакты исследуемого образца R_x через добавочный высокоомный резистор R_d подавалось напряжение с источника тока ИТ. Поскольку сопротивление резистора R_d на порядок превосходит максимально достигаемые в эксперименте значения R_x , изменением тока в цепи, обусловленным изменением сопротивления образца в магнитном поле, можно пренебречь. Ток через образец контролировался при помощи чувствительного амперметра А (в последних экспериментах амперметр был заменен прецизионным сопротивлением, падение напряжения на котором непосредственно измерялось с помощью аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.) платы сбора данных, на схеме не показанного). Переменная составляющая U_x падения напряжения на образце измерялась при помощи селективного нановольтметра НВ (Unipan type 233). Выходной сигнал с НВ, пропорциональный измеряемому сигналу, подавался на один из входов платы сбора данных ПСД, установленной в персональном компьютере ПК. ПСД, специально разработанная для проведения подобного рода измерений, включает в себя программируемый контроллер на микросхеме К580ВВ55А, а.ц.п. К1113ПВ1 (10-разрядный в униполярном режиме, 9-разрядный – в биполярном), программно-управляемый усилитель сигнала с коэффициентом усиления $K_{ус} = 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ и шесть программно-коммутируемых каналов ввода. Конструктивно плата выполнена в виде карты расширения для шины ISA персонального компьютера типа IBM-PC. Наличие программно-управляемого усилителя позволяет проводить измерение сильно меняющихся сигналов с высокой чувствительностью, оставаясь в пределах одного диапазона селективного нановольтметра НВ. В процессе измерения образец помещался в азотный криостат КС, измерения про-

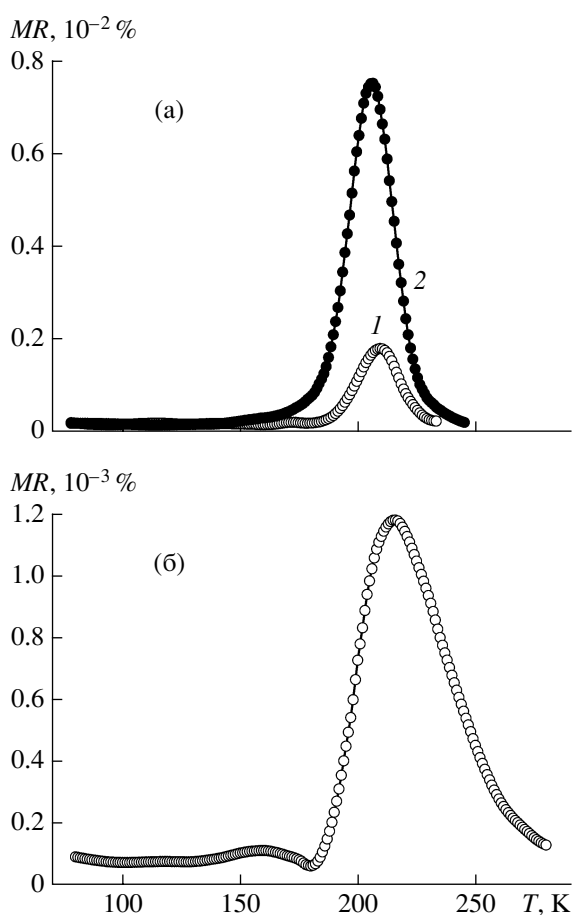


Рис. 2. Экспериментальные кривые $MR(T)$: **а** – образец $Co_{15}Cu_{85}$, магнитное поле прикладывалось в плоскости пленки перпендикулярно направлению тока ($1 - H = 2$ Э, $2 - H = 4$ Э); **б** – образец $Co_{20}Cu_{80}$, поле перпендикулярно плоскости пленки, $H = 35$ Э.

водились в режиме медленного нагрева от температуры жидкого азота до 300 К. Для контроля температуры применялась хромель-константановая термопара с блоком электронной компенсации ОМЕГА-CJ. Сигнал термопары усиливался высокостабильным усилителем $У$ с $K_{yc} = 23.5$ и по-

давался на второй вход ПСД. Таким образом, в процессе нагрева образца измерялась температурная зависимость изменения сопротивления $\Delta R(T)$ в магнитном поле малой напряженности.

Температурная зависимость собственного сопротивления образца $R_0(T)$, необходимая для вычисления величины MR , также измерялась на данной установке. Для этого в цепи измерительных контактов нановольтметр $НВ$ заменялся усилителем постоянного напряжения, сигнал с которого подавался на ПСД, и непосредственно измеряемой величиной в этом случае являлось падение напряжения на образце $U_{const}(T)$.

На рис. 2 приведены примеры экспериментальных зависимостей $MR(T)$, полученных на описанной установке при измерении пленок пространственно-неоднородных сплавов $Co-Cu$: на рис. 2а для образца состава $Co_{15}Cu_{85}$ в геометрии, когда магнитное поле прикладывалось в плоскости пленки перпендикулярно току, на рис. 2б для образца $Co_{20}Cu_{80}$, поле перпендикулярно плоскости пленки (магниторезистивный эффект в обоих случаях отрицательный, по оси ординат приводится абсолютное значение магнитосопротивления). Резко выраженный максимум на кривых соответствует температуре магнитного упорядочения метастабильной фазы сплава Co_xCu_{100-x} с $x = 30-35$, формирующейся в исследованных пленках. Сравнение результатов, полученных описанным методом и при измерении в постоянном поле с использованием мостовой схемы, показывает их хорошее соответствие.

Таким образом, в работе показана возможность исследования магнитосопротивления в пленочных материалах в слабых магнитных полях без использования сверхчувствительной и дорогой техники. Проведены измерения зависимостей $MR(T)$ с точностью $\sim 10^{-5}\%$ в металлических пленках неоднородных сплавов $Co-Cu$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. С. 941.