

РАДИОЧАСТОТНЫЙ РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ РАССЕЯНИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГРАНИЦЕ ДИФФУЗНОГО СЛОЯ ПРИМЕСЕЙ

С. В. Гуденко, И. П. Крылов

Экспериментально обнаружен новый тип радиочастотного размерного эффекта, обусловленный "отсечкой" траекторий эффективных электронов на границе слоя примесных атомов, продиффундировавших вглубь металлического монокристалла. На основе этого эффекта измерен коэффициент диффузии свинца в монокристалле индия.

В экспериментах, проводившихся при температурах жидкого гелия, изучался радиочастотный размерный эффект (РРЭ) в монокристаллических дисках диаметром 18 мм и толщиной $d = 0,3$ мм, изготовленных из индия высокой чистоты с содержанием примесей менее $10^{-4}\%$ и длиной свободного пробега электронов более 1 мм. На одну из плоских поверхностей индиевого образца с помощью испарения в вакууме была нанесена пленка свинца толщиной $10^{-5} \div 10^{-4}$ см. К противоположной поверхности образца была прижата плоская катушка колебательного контура радиочастотного генератора. Изменения мнимой части X поверхностного импеданса образца в зависимости от внешнего однородного магнитного поля H приводили к изменениям частоты генерации и регистрировались на самописце с помощью стандартной модуляционной методики [1].

Перед нанесением свинцовой пленки одна из плоских поверхностей образца, изготовленного в разборной полированной кварцевой форме по известному методу [2], очищалась с помощью катодного распыления в тлеющем разряде. Для этого образец, испаритель свинца и алюминиевый анод размещались в стеклянной ампуле, которая во время разряда погружалась в жидкий азот и наполнялась чистым аргоном. После проведения разряда ампула откачивалась до давления остаточных газов 10^{-5} мм рт.ст., при котором производилось испарение свинца. После нанесения свинцовой пленки образец помещался в гелиевый прибор. Для всех использовавшихся образцов непосредственно после их изготовления в кварцевой форме и перед началом манипуляций с поверхностью были произведены контрольные записи линий РРЭ.

На рис. 1 приведены примеры записей наиболее интенсивной линии РРЭ в индии, обусловленной электронами экстремального сечения ферми-поверхности во второй энергетической зоне [3], в магнитном поле, параллельном плоской поверхности образца. Как известно (см., например, [1]), появление особенности импеданса – линии РРЭ – в некотором поле $H = H_0$ обусловлено тем, что эффективные электроны экстремального сечения, которые вносят наибольший вклад в высокочастотный ток в скин-слое, при $H < H_0$ сталкиваются с противоположной поверхностью образца. Очевидно, для заданного сечения ферми-поверхности

величина поля $H_o \propto d^{-1}$, а форма линии РРЭ определяется распределением переменных полей в скин-слое и характером рассеяния электронов на поверхности металла. Сравнение записей 1 и 2 позволяет заключить, что наличие сверхпроводящей свинцовой пленки изменило характер рассеяния электронов на поверхности монокристалла индия. Во-первых, изменилась форма линии при $H = H_o$. Во-вторых, появилась сравнимая с ней по амплитуде линия РРЭ в поле $H = H_o/2$, обусловленная "андреевским" характером отражения электронов от границы нормального металла со сверхпроводником [4]. Качественное сопоставление амплитуд двух линий на кривой 2 позволяет заключить, что вероятность "андреевского" отражения электронов была заметно меньше единицы. Иначе говоря, большая часть электронов на границе In – Pb рассеивалась диффузно, по-видимому, благодаря различным неоднородностям границы между монокристаллом, и напыленной пленкой. Большая чувствительность "андреевской" линии к качеству границы In – Pb объясняет также тот факт, что в опытах с шестью образцами линия в поле $H = H_o/2$ после напыления пленки свинца наблюдалась только на двух образцах.

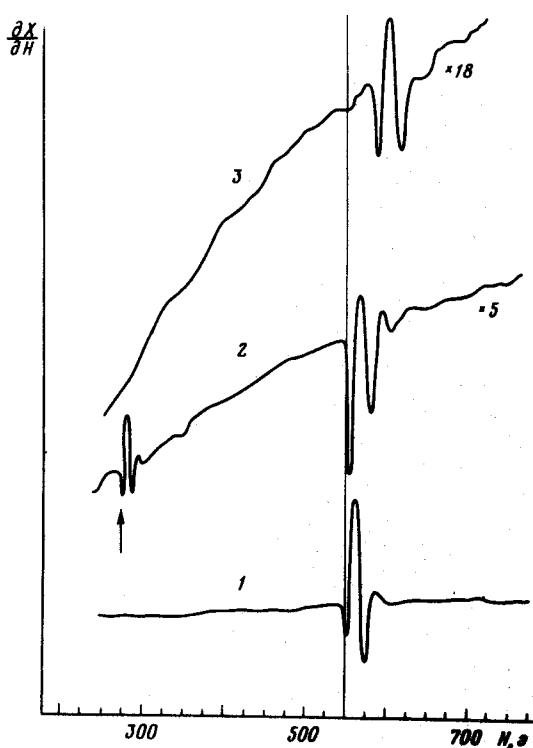


Рис. 1. Записи производной dX/dH в относительных единицах, полученные при следующих условиях: 1 – до напыления свинцовой пленки; 2 – после напыления свинцовой пленки; 3 – после проведения диффузионного отжига при 22°C в течение 10,5 суток и при 120°C в течение 40 минут. Тонкая вертикальная черта соответствует полю $H = H_o$ для записей 1 и 2, стрелка указывает поле $H_o/2$. Ориентация нормали к плоской поверхности образца $n \parallel [100]$, поле $\mathbf{H} \parallel [001]$, $T = 1,5\text{K}$, частота 2,4 МГц, образец 1

Кривая 2, полученная в опытах с одним из этих образцов, воспроизводилась в повторных экспериментах, если образец между гелиевыми опытами поддерживался при температуре жидкого азота. Однако после отжига образца при комнатной температуре в течение нескольких часов,

"андреевская" линия исчезла, а поле H_0 увеличивалось. Увеличение поля H_0 означает уменьшение диаметра электронной траектории, при котором происходит эффект "отсечки", что в свою очередь объясняется тем, что рассеяние электронов происходит теперь на продиффундировавших вглубь монокристалла индия атомах свинца. Отжиг образца в течение нескольких часов при температуре 120 °С приводил к значительному увеличению поля H_0 (кривая 3).

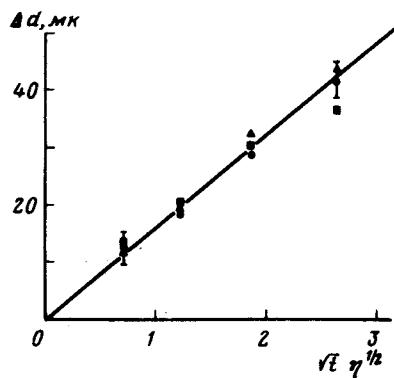


Рис. 2. Зависимость сдвига линии РРЭ от длительности диффузионного отжига при 120 °С, пересчитанная в эффективное изменение толщины образца. Различные значки соответствуют различным ориентациям поля: ▲ — $H \parallel [001]$; ● — $\times (H, [001]) = 13^\circ$, ■ — $\times (H, [010]) = 23^\circ$; образец 2: п — $n \parallel [100]$.

Вероятность того, что эффективные электроны, диаметр траектории которых $2R < d$, пройдут в глубине металла и опять вернутся в скин-слой, дается формулой $A = \exp(-\int w ds)$, где w — вероятность рассеяния электронов на единицу длины, интеграл берется вдоль траектории [1]. Если считать, что величина $w \approx C/a$, где C — концентрация примеси свинца, a — межатомное расстояние (мы пренебрегаем концентрацией равномерно распределенных остаточных примесей), и полагать, что распределение атомов свинца описывается решением уравнения для нестационарной диффузии с постоянным коэффициентом диффузии D и длительностью процесса t , то применительно к условиям наших экспериментов, можно получить оценку величины

$$A \approx \exp[-10^5 \exp(-x^2/4Dt)].$$

В этой формуле величина x означает минимальное расстояние электрона, движущегося по круговой траектории, от той поверхности пластины, на которую был нанесен свинец. Ввиду наличия экспоненциальных функций и большого численного множителя величина A меняется от $A \approx 0$ до $A \approx 1$ в узком интервале значений x ширины $\sim \sqrt{Dt}$ вблизи величины $x = 7\sqrt{Dt}$, причем значение численного коэффициента очень слабо зависит от сечения рассеяния. Если глубина скин-слоя $\delta \gtrsim \sqrt{Dt}$, то наличие диффузного слоя примесей вблизи противоположной поверхности образца должно приводить к некоторому увеличению ширины линии эффекта "отсечки" и более существенному сдвигу положения линии РРЭ, соответствующему уменьшению эффективной толщины образца на величину $\Delta d = x = 7\sqrt{Dt}$.

Экспериментальные результаты по измерению величины H_o , полученные на образце 2 для различных линий РРЭ, в зависимости от длительности диффузионного отжига приведены на рис. 2. Заметим, что на этом образце при сдвиге в сильные поля форма и амплитуда линии менялись незначительно. Из наклона прямой, проходящей в пределах погрешностей через экспериментальные точки, можно определить значение коэффициента диффузии.

Диффузионный отжиг при 120°C проводился на двух образцах одинаковой кристаллической ориентации. Для образца 1 получено значение $D = (1,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{сек}$; для образца 2 $D = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{сек}$. На образце 1 достаточно длительный диффузионный отжиг был проведен также при комнатной температуре (22°C). При этом получено значение $D = (2,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{сек}$. Считая, что величина $D \propto \exp(-\epsilon/kT)$ [5], где ϵ — энергия активации в расчете на один атом, k — постоянная Больцмана, получим для диффузии свинца в монокристалл индия вдоль направления [100] значение $\epsilon = 0,65 \pm 0,05 \text{ эВ/атом}$.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 июля 1978 г.

Литература

- [1] Э.А.Канер, В.Ф.Гантмахер. УФН, **94**, 193, 1968.
- [2] Ю.В.Шарвин, В.Ф.Гантмахер. ПТЭ, №6, 1936, 1963.
- [3] В.Ф.Гантмахер, И.П.Крылов. ЖЭТФ, **49**, 1054, 1965.
- [4] И.П.Крылов, Ю.В.Шарвин. ЖЭТФ, **64**, 946, 1973.
- [5] П.Шьюмон. Диффузия в твердых телах, М., изд. Металлургия, 1966,
стр. 68.