

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВАХ ТОНКИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

В.А.Березин, С.А.Говорков, В.А.Тулин

Показано, что амплитуда возникновения нелинейности в тонких сверхпроводящих пленках, связанной с рождением пар вихрей вблизи T_c , ограничена снизу. Это ограничение определяется поперечными размерами пленки.

Известно, что при приближении к критической температуре (T_c) снизу, параметр порядка стремится к нулю. Вместе с ним стремятся к нулю и критические величины, характеризующие сверхпроводимость: критическое магнитное поле, критический ток и прочие. Если амплитуда переменного магнитного поля, действующая на сверхпроводящий объект (лучшую пленку или тонкую проволоку) или индуцируемый им ток превышает критическое значение, то свойства объекта будут периодически меняться с частотой переменного поля. Это проявляется в нелинейных эффектах. Так как критические параметры стремятся к нулю

при приближении к T_c , разумно предположить, что любая амплитуда переменного поля при соответствующей близости к T_c может приводить к нелинейным эффектам. Однако, в этой работе мы показываем, что один из нелинейных эффектов в сверхпроводящих тонких пленках возникает пороговым образом (это было обнаружено ранее в работе ¹), и величина амплитуды высокочастотного (ВЧ) поля возникновения нелинейности связана с поперечными размерами пленки соотношением

$$h_c^{min} D^{3/2} = \text{const}$$

где h_c^{min} — минимальная критическая амплитуда ВЧ поля, при которой возникает нелинейность, D — поперечный размер пленки (например, диаметр в случае круглой пленки). h_c^{min} стремится к нулю при $T \rightarrow T_c$ только в случае, если $D \rightarrow \infty$.

Мы исследовали генерацию третьей гармоники тонкой сверхпроводящей пленкой ($d \ll \lambda, \xi$, где d — толщина пленки, λ — глубина проникновения магнитного поля и ξ — длина когерентности) при "одностороннем" облучении ¹ вблизи T_c . Объектом исследования были пленки алюминия, термически напыленные в "диффузионном" вакууме $\sim 10^{-5}$ торр на стеклянную подложку. Толщина пленок, определенная кварцевыми весами, составляла около 45 нм. Температура сверхпроводящего перехода пленок была $\sim 1,4$ К. Измерения проводились на установке, описанной в ¹.

Через диафрагму в медном экране облучался небольшой участок большой по площади пленки алюминия. С другой стороны пленки размещалась приемная катушка. Сигнал третьей гармоники от частоты облучения 123 Гц ($3f = 369$ мГц) поступал из катушки в приемник с чувствительностью 10^{-15} Вт и регистрировался при прохождении температуры через T_c в зависимости от мощности облучения и размеров диафрагмы. Использовались два размера диафрагмы: $\Phi = 1,9$ мм и $\Phi = 3,5$ мм.

После изготовления образца производились измерения сначала с диафрагмой одного размера. Затем образец перенесен на экран с другим размером диафрагмы и измерения производились вновь. Для того чтобы мощность, поступающая в контур, при смене диафрагмы не менялась, контролировалась величина связи контура с подводящей линией. Поскольку все остальные части схемы были неизменны в процессе измерения, можно считать, что амплитуда ВЧ магнитного поля вблизи поверхности пленки воспроизводилась от опыта к опыту с точностью порядка 10 %. Образец, разонансный контур, приемная катушка и экраны при измерениях находились в сверхтекучем гелии. Изменение температуры осуществлялось изменением скорости откачки криостата. Относительные измерения температуры и ее регистрация на самописце производились с помощью угольного термометра.

На рис. 1 представлены примеры записи амплитуды третьей гармоники, излучаемой пленкой, в зависимости от температуры ванны для нескольких значений мощности облучения. Из этих данных мы получали зависимость максимальной амплитуды третьей гармоники от амплитуды поля на пленке. Эта зависимость для одной и той же пленки и двух размеров диафрагмы приведена на рис. 2. Экстраполяция линейных участков до пересечения с осью абсцисс дает нам пороговое значение амплитуды облучения, при котором существует данный нелинейный эффект. Увеличение размеров диафрагмы (размеров облучаемой части пленки) приводит к уменьшению пороговой мощности. Для используемых диафрагм 1,9 и 3,5 мм она уменьшалась на 8,2 дБ и 7,1 дБ для двух различных образцов. Мы провели измерения на 7 пленках, результаты с точностью до ошибки измерения соответствуют приведенным первым образцам.

В экспериментальной ситуации, имеющей место в данной работе, пленка в нормальном состоянии прозрачна для высокочастотного поля, в сверхпроводящем состоянии практически не прозрачна. При температуре несколько ниже критической магнитное поле не проникает через диафрагму, закрытую сверхпроводящей пленкой. При этом реализуется одностороннее облучение пленки. Полагаем, как и в работе ¹, что при достижении в пленке критического тока J_c , индуцированного ВЧ магнитным полем, в пленке рождаются пары вихрей против-

воположного знака, которые обратимым образом аннигилируют при уменьшении магнитного поля в следующую часть периода. Основной величиной размерности длины в этом случае будет глубина проникновения перпендикулярного магнитного поля в пленку $\lambda_{\perp} = 2\lambda^2/d$. Эта же величина определяет размер вихря в пленке. Вблизи критической температуры сверхпроводящего перехода $\lambda_{\perp}(T)$ может достигать макроскопических размеров.

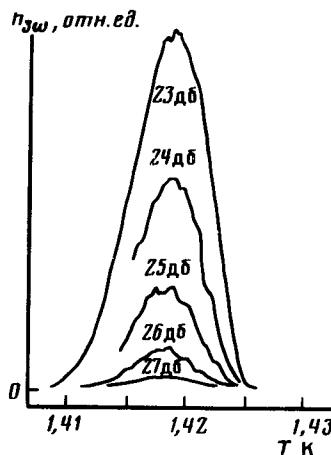


Рис. 1

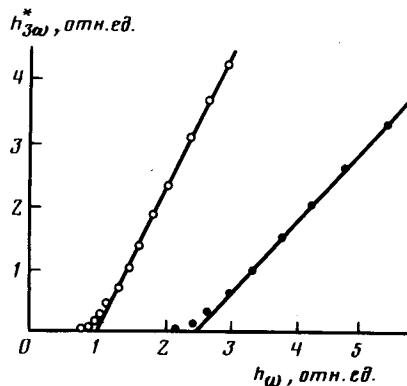


Рис. 2

Рис. 1. Примеры записи зависимости максимальной мощности излучения сверхпроводящей пленкой третьей гармоники от температуры вблизи T_c

Рис. 2. Зависимость максимальной мощности третьей гармоники, излучаемой пленкой от амплитуды ВЧ поля, облучающего пленку, для двух размеров диафрагмы: ● – диаметр диафрагмы 3,5 мм, ○ – диаметр диафрагмы 1,9 мм

Мы имеем две зависящие от температуры величины $J_c(T)$ (или $P_c(T)$) и $\lambda_{\perp}(T)$. При этом могут быть две различные ситуации. Если величина ВЧ мощности такова, что она является критической при температуре, когда $\lambda_{\perp} \ll D$, где D – размер диафрагмы, то возникающие пары вихрь – антивихрь приводят к нелинейным эффектам и мы наблюдаем третью гармонику. Если же ВЧ мощность мала, так что она является критической при температуре, когда $\lambda > D$, мы не можем рассматривать отдельные вихри, образующие пары. Экранирующие точки вихрей разного знака перекрываются и взаимоуничтожаются. Это означает, что сверхпроводящая компонента пленки не экранирует ВЧ магнитное поле. В этой ситуации нелинейные эффекты, связанные с проникновением пар вихрей, не должны проявляться. При понижении температуры размеры вихрей становятся меньше размеров диафрагмы, но установленная мощность при этом будет меньше критической и нелинейные эффекты не будут наблюдаться.

В работе² было показано, что в ситуации, аналогичной данной, критическая мощность $P_c(T) \sim (T_c - T)^3$. Используя температурную зависимость $\lambda_{\perp} = 2\lambda^2/d \sim (T_c - T)^{-1}$ и вводя условную границу исчезновения нелинейных эффектов, связанных с возникновением пар вихрей, $\lambda_{\perp} = D$ можно получить следующее соотношение для одной и той же пленки, облучаемой через разные диафрагмы:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\lambda_{\perp 2}}{\lambda_{\perp 1}} = \left(\frac{P_{c1}^{min}}{P_{c2}^{min}} \right)^{1/3} \quad \text{или} \quad D^{3/2} (h_c^{min}) = \text{const.}$$

Величина критической мощности возникновения описанной нелинейности обратно пропорциональна кубу диаметра диафрагмы. Подстановка используемых размеров диафрагм дает $P_{c1}^{min} / P_{c2}^{min} = 6,25$, что соответствует 8 дБ, т. е. хорошо совпадает с экспериментальными значениями.

Результаты этой работы указывают на то, что при прохождении по температуре (или по какому-либо другому параметру, от которого зависит λ_{\perp}) происходит изменение электродинами-

намических свойств пленки, когда $\lambda_{\perp} \approx D$. Ввиду этого следует осторожно относиться к интерпретации результата исследований фазовых переходов в квазидвумерных сверхпроводящих системах (переход Костерлица – Таулиса).

Литература

1. Говорков С.А., Толпиго С.К., Тулин В.А. ЖЭТФ, 1985, 89, 704.
2. Березин В.А., Говорков С.А., Толпиго С.К., Тулин В.А. ФТТ, 1985, 27, 1953.

Институт проблем технологий микроэлектроники
и особо чистых материалов
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 февраля 1986 г.
После переработки
2 апреля 1986 г.