

Генерация когерентного электромагнитного излучения сверхпроводящими пленками при азотных температурах

А. Н. Лыков¹⁾

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 16 марта 2001 г.

После переработки 16 апреля 2001 г.

Обнаружена генерация когерентного электромагнитного излучения сверхпроводящими пленками $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ в диапазоне 1–10 МГц при температуре кипения жидкого азота. Генерация данного типа вызвана синхронизацией, осуществляемой за счет обратной связи, “прыжков” вихрей Абрикосова, создаваемых внешним низкочастотным магнитным полем. Это открывает новые возможности использования ВТСП в сверхпроводниковой электронике.

PACS: 74.60.Ge, 85.25.-j

Одной из наиболее интересных проблем в современной сверхпроводимости является создание генератора электромагнитного излучения. Впервые такую возможность обнаружил Джозефсон в работе [1], но на пути использования джозефсоновских контактов в качестве генераторов излучения стоят два серьезных препятствия: малая генерируемая мощность и малое выходное сопротивление, препятствующее их согласованию с внешней электромагнитной системой. Несмотря на некоторые успехи, достигнутые в последнее время при использовании решеток джозефсоновских контактов [2], а также таких контактов в режиме течения потока [3], эти проблемы до сих пор не преодолены. После открытия высокотемпературных сверхпроводников появилась принципиальная возможность создания сверхпроводниковых устройств, работающих при температурах жидкого азота, что дополнительно стимулирует интерес к этому направлению.

В работе [4] был предложен новый подход к созданию сверхпроводниковых генераторов электромагнитного излучения, основанный на синхронизации резонансным контуром “прыжков” вихрей Абрикосова, вызванных внешним низкочастотным магнитным полем. В этой работе обнаружена генерация сверхпроводящими пленками Nb когерентного электромагнитного излучения в диапазоне 0.15–200 МГц, которая является результатом воздействия на пленку двух электромагнитных полей, направленных перпендикулярно к ее поверхности. Первое из них, создаваемое транспортным током, пропускаемым через катушку, сравнительно медленно меняется во времени и вызывает движение вихрей Абрикосова в пленке. Второе, высокочастотное, синхронизирует

“прыжки” вихрей с неоднородности на неоднородность. При этом в качестве высокочастотного поля используется за счет цепи обратной связи само генерируемое пленками излучение. В данной работе сообщается о наблюдении генерации, основанной на этом явлении, электромагнитного излучения ВТСП пленками при азотных температурах.

Измерения были выполнены на пленках $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, приготовленных В.И.Дедю методом импульсного катодного напыления [5]. Этот метод напыления напоминает лазерное напыление пленок. Пленки $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ выбраны среди других купратных пленок ВТСП типа 1-2-3 из-за того, что в них наблюдалась лучшая однородность по кислороду и более высокая стабильность и воспроизводимость. В качестве подложек использовались полированные монокристаллические пластины $NdGaO_3$ с кристаллической ориентацией (110). Критическая температура пленок была в диапазоне 91–92.6 К при ширине перехода ~ 0.5 К.

Схема измерений показана на рис.1. Пленка помещалась в переменное магнитное поле, которое из-

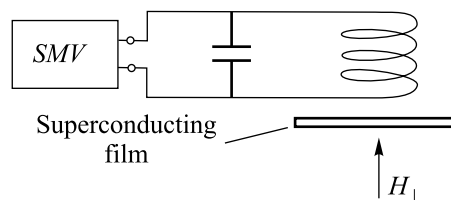


Рис.1. Схема измерений, SMV – селективный микровольтметр

менялось по закону $H_{\perp} = H_{\perp 0} \sin(2\pi f_{\text{exc}} t)$, где t обозначает время. При этом амплитуда ($H_{\perp 0}$) изменения поля достигала 100 Э, а частота (f_{exc}) находилась

¹⁾ e-mail: lykov@sci.lpi.msk.su

в пределах 17 Гц–1 кГц. Это поле создает вихри Абрикосова в пленке, причем взаимодействие вихрей с неоднородностями в ней препятствует переходу вихревой системы в равновесное состояние. Отклонение вихревой системы от положения равновесия проявляется в гистерезисе кривой намагничивания. Вероятность P , с которой вихри или связки вихрей могут покинуть центр пиннинга и перескочить на соседний центр или выйти из пленки, пропорциональна следующему соотношению:

$$P \sim \Omega \exp(-U/k_B T),$$

где T – температура, k_B – постоянная Больцмана, U – глубина потенциальной ямы центра пиннинга и Ω – характерная частота попыток, с которой вихри пытаются сорваться с этого центра. Такое неупорядоченное движение вихрей приводит к генерации сверхпроводящей пленкой шумового электромагнитного излучения.

Вблизи пленки размещается индуктивность резонансного контура, что обеспечивает электромагнитную связь между пленкой и контуром (рис.1). Энергия взаимодействия вихрей Абрикосова с центрами пиннинга зависит от многих параметров, в частности, от внешнего магнитного поля. Поэтому электромагнитные колебания, возникающие случайным образом в контуре, периодически помогают некоторым вихрям преодолеть потенциальные барьеры и перепрыгнуть на соседние центры пиннинга. При этом генерируется электромагнитный импульс, который в свою очередь увеличивает энергию электромагнитных колебаний в контуре. Если потери в контуре меньше, чем вносимая таким образом в контур энергия, то амплитуда колебаний в нем нарастает. Таким образом, реализуется обратная связь и осуществляется синхронизация прыжков вихрей в пленке. Спектр излучения измерялся с помощью селективного микровольтметра В6-1, имеющего рабочий диапазон 0.15–35 МГц при полосе 10 кГц. При этом сигнал на микровольтметр подавался по коаксиальной линии непосредственно с резонансного контура.

Обнаружена генерация когерентного электромагнитного излучения сверхпроводящими пленками $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в диапазоне 1–10 МГц при температуре кипения жидкого азота. Пример спектра генерации показан на рис.2. Как и в работе [4], частота генерации определяется параметрами резонансного контура с помощью обычного соотношения $f = 1/2\pi(LC)^{0.5}$, то есть, меняя индуктивность и емкость контура, можно менять частоту генерируемого электромагнитного излучения. При этом присутствие сверхпроводящей пленки не влияет на добротность резонансного контура и приводит лишь

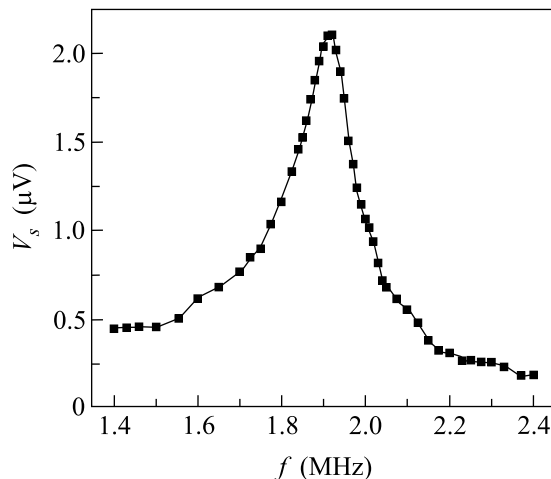


Рис.2. Пример зависимости амплитуды сигнала, генерируемого пленкой $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, от частоты, $H_{\perp 0} = 82$ Э и $f_{\text{exc}} = 915$ Гц. Измерения выполнены в жидком азоте ($T = 77.4$ К)

к небольшому ($\sim 5\%$) уменьшению индуктивности по сравнению с контуром без пленки. Это указывает на то, что в нашем случае диссипация энергии в контуре существенно больше диссипации в пленке. Без резонансного контура движение вихрей в пленке носит случайный характер и, как результат, только слабое шумовое излучение может быть зарегистрировано в этом случае. Было обнаружено, что его мощность уменьшается с увеличением частоты регистрации, что приводит к уменьшению мощности генерируемого излучения с увеличением частоты генерации f . Это объясняется тем, что шумовое и когерентное излучение имеют одинаковую природу, так как оба они являются результатом движения вихрей в пленке. Максимальная частота генерации пленками $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, которую удалось реализовать в наших экспериментах, существенно меньше, чем максимальная частота, регистрируемая в аналогичных экспериментах с использованием пленок Nb [4]. Это может быть объяснено тем, что на вихревые свойства ВТСП, особенно при азотных температурах, большое влияние оказывает крип потока, что приводит, в частности, к уменьшению гистерезиса кривой намагничивания, вызванного пиннингом вихрей Абрикосова. При некоторой температуре, называемой температурой фазового перехода вихревое стекло – вихревая жидкость, этот гистерезис, который является источником энергии излучения, совсем исчезает [6]. С увеличением температуры отклонение вихревой системы от равновесного состояния уменьшается, поскольку вероятность P перескока вихрей на соседний центр пиннинга увеличивается

с увеличением энергии тепловых флуктуаций. Это приводит к уменьшению электромагнитных колебаний в контуре и к ослаблению влияния обратной связи на движение вихрей в пленке. Все это приводит к уменьшению энергии генерируемого пленками ВТСП электромагнитного излучения. Поскольку амплитуда генерируемого излучения, так же как и величина электромагнитных шумов, увеличивается с уменьшением частоты, частотный диапазон регистрации излучения пленками ВТСП уменьшается по сравнению с пленками ниобия.

На рис.3 показан пример квадрата амплитуды генерируемого сигнала V_s^2 от $H_{\perp 0}$. Частота генерации

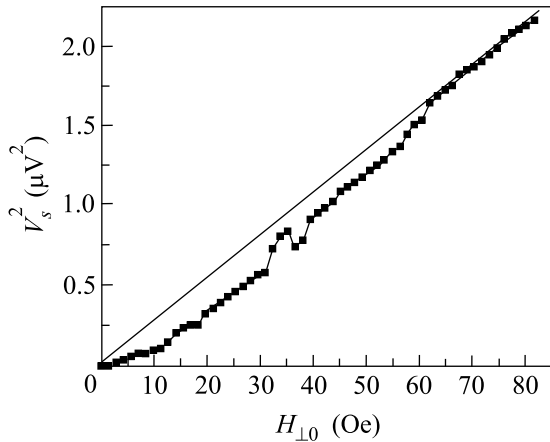


Рис.3. Зависимость V_s^2 от амплитуды возбуждающего магнитного поля $H_{\perp 0}$ при $T = 77.4$ К. В данном случае частота генерации – 2.45 МГц, а $f_{\text{exc}} = 810$ Гц

в данном случае $f = 2.45$ МГц, а частота возбуждающего магнитного поля $f_{\text{exc}} = 810$ Гц. Как видно из этого рисунка, квадрат амплитуды генерируемого сигнала, который пропорционален генерируемой мощности, увеличивается с увеличением $H_{\perp 0}$. Также было обнаружено, что мощность излучения увеличивается с увеличением частоты f_{exc} . Это связано с тем, что излучаемая мощность пропорциональна количеству вихрей Абрикосова, участвующих в процессе, и количеству перецикливаний намагничивания в единицу времени. Небольшое отклонение от линейного закона при малых $H_{\perp 0}$ вызвано влиянием эффекта Мейснера. Кроме того, мощность и максимальная частота излучения уменьшаются с увеличением температуры, и вблизи критической температуры пленки эта генерация исчезает. С увеличением температуры уменьшаются силы пиннинга, которые препятствуют вихрям занимать в пленке положения с минимальной энергией, что приводит к уменьшению гистерезиса кривой намагничивания.

Таким образом, данная работа доказывает, что пленки из высокотемпературных сверхпроводников могут генерировать высокочастотное электромагнитное излучение. Принцип работы сверхпроводниковых генераторов данного типа основан на синхронизации резонансным контуром “прыжков” вихрей Абрикосова, создаваемых внешним низкочастотным магнитным полем. В этом плане поведение ВТСП пленок близко к поведению пленок ниобия [4]. Важным результатом работы является то, что генерация когерентного электромагнитного излучения сверхпроводниковыми структурами наблюдалась не только при гелиевых температурах, но и при температуре кипения жидкого азота. Это открывает новые возможности использования ВТСП в сверхпроводниковой электронике. Важным достоинством данного метода генерации является возможность получения больших мощностей излучения, которая достигается за счет увеличения площади части сверхпроводящей пленки, участвующей в процессе, а также путем увеличения амплитуды $H_{\perp 0}$ и частоты f_{exc} электромагнитного поля, возбуждающего вихревую систему в пленках. Кроме того, обнаруженное явление предоставляет новые возможности для исследования нестационарных и неравновесных эффектов вихревой системы в сверхпроводниках, например, для определения физической природы частоты попыток (Ω), с которой вихри пытаются сорваться с центров пиннинга. Кроме того, использование резонансных контуров с высокой добротностью позволит получить дополнительную информацию, касающуюся диссипации сверхпроводников в смешанном состоянии.

Эта работа была выполнена при финансовой поддержке Научно-технического совета по физике конденсированных сред (проект #30396), Российского фонда фундаментальных исследований (проект #00-02-16076) и Российско-Украинского проекта “Эталон”.

В заключение автор выражает благодарность В.И.Дедю за предоставленные пленки $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

1. B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).
2. A. K. Jain, K. K. Likharev, J. E. Lukens et al., Phys. Rep. **109**, 309 (1984).
3. V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **7**, 2905 (1997).
4. A. N. Lykov, Phys. Lett. **A281**, 48 (2001).
5. В. Г. Канцер, Д. В. Гицу, В. И. Дедю и др., Известия АН РМ, вып. Физика и Техника №2, 6 (1992).
6. R. H. Koch, V. Foglietti, W. J. Gallagher et al., Phys. Rev. Lett. **63**, 1151 (1989).