

УДК 537.312.62

Формирователь гармоник на основе поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

А. И. Головашкин

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

Н. Д. Кузьмичев

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск, Россия

В. В. Славкин

Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ, г. Саранск, Россия

На основе поликристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ разработано устройство — формирователь гармоник, в котором используются нелинейные магнитные свойства данного высокотемпературного сверхпроводника. Устройство позволяет формировать широкий спектр гармоник. Амплитуды высших гармоник плавно уменьшаются с увеличением номера гармоники. Предлагаемое устройство имеет широкий динамический диапазон, проще конструктивно и более надежно по сравнению с имеющимися устройствами.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости создало возможности для более широкого внедрения в повседневную практику различных сверхпроводниковых устройств [1—6]. Причиной этому, помимо уникальных возможностей, которые сверхпроводимость открыла перед радиоэлектроникой (высокие чувствительность и точность измерительных средств, близкие к предельным квантовым), является сильно пониженное требование к мощностям криостатирования. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) благодаря своим свойствам остаются привлекательными в качестве материалов для применений в различных областях слаботочной прикладной сверхпроводимости. При этом если для многих физических исследований необходимы качественные пленки или монокристаллы ВТСП, то для целого ряда приложений необходима и достаточна простота изготовления поликристаллических образцов. В некоторых случаях параметры поликристаллических образцов предпочтительнее соответствующих характеристик эпитаксиальных пленок и монокристаллов. Одним из основных ра-

боточих ВТСП-материалов современной сверхпроводниковой электрони-

© Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., 2007

В настоящее время в радиоэлектронной промышленности в качестве умножителей частоты обычно используются колебательные контуры, содержащие в качестве нелинейного элемента варикап [7]. Емкость варикапа зависит от амплитуды входного сигнала, что и используется для умножения частоты. Однако варикап обладает малой емкостью и поэтому неэффективен на низких частотах. Кроме того, варикап ненадежен при больших значениях входного сигнала и при значительных кратностях (10 раз и более) умножения частоты. Умножитель частоты на основе варикапа имеет к тому же сложную электронную схему [7]. Наиболее перспек-

тивным методом повышения эффективности умножения частоты в широком диапазоне частот, включая и область низких частот, и упрощения электронной схемы умножителя частоты является использование нелинейных магнитных свойств ВТСП-материалов в слабых и сверхслабых магнитных полях $B < 10^{-4}$ Тл.

В работах [8—13] исследовался нелинейный магнитный отклик поликристаллов YBCO на синусоидальное низкочастотное (частота $\nu < 10^4$ Гц) внешнее магнитное поле при температуре $T = 77$ К. Нелинейный отклик проявлялся в искажении формы выходного сигнала (рис. 1). При подаче синусоидального напряжения на образец в спектре выходного сигнала появляются высшие гармоники. При разработке формирователя гармоник в настоящей работе использовался 2-катушечный компенсационный метод измерения намагниченности [8—11]. Синусоидальный сигнал подавался на входную катушку (катушку возбуждения). Внутри нее были расположены две одинаковые встречно намотанные выходные катушки индуктивности, в одной из выходных катушек находился образец. Сигнал отклика с выходных катушек подавался на вход селективного вольтметра ЭПС с сигнала отклика, возникающая во

$$M = \frac{S}{N} \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

где M — намагниченность образца;

S — сечение образца;

N — число витков приемной катушки;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная;

t — время.

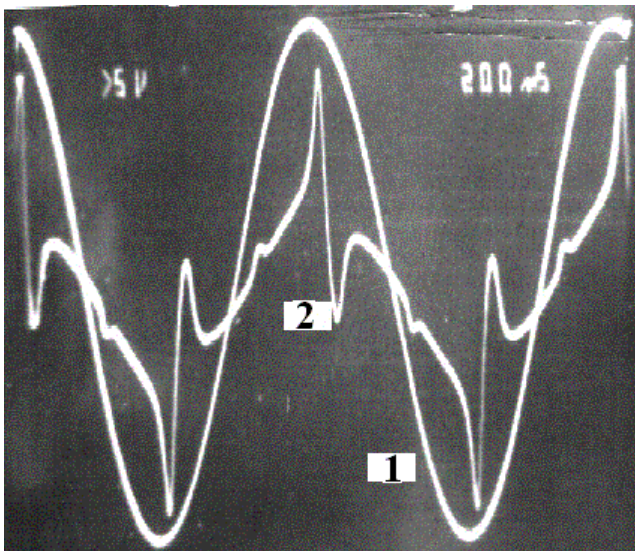


Рис. 1. Входной синусоидальный сигнал (1) и выходной сигнал (2) отклика поликристалла YBCO

Исследовались амплитуды (напряжения) гармоник ϵ_n , возникающие на вторичной катушке с поликристаллом YBCO при воздействии на него переменного магнитного поля катушки возбуждения. Величины ϵ_n пропорциональны амплитудам гармоник намагниченности M_n ($\epsilon_n = \mu_0 N S_n \omega M_n / \sqrt{2}$) [14, 15]:

$$M_n = 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!(m+n)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2m+n} \frac{dM^{2m+n}(0)}{dH^{2m+n}}, \quad (2)$$

где n — номер гармоники;
 ϵ_n — напряжение n -й гармоники;
 $\omega = 2\pi\nu$ — частота поля;
 H — напряженность магнитного поля;

$\frac{dM^{2m+n}(0)}{dH^{2m+n}}$ — производная порядка $2m+n$ по H от намагниченности $M(H)$, вычисленная для $H = 0$;
 h — амплитуда переменного магнитного поля.

Использовались амплитуды переменного магнитного поля h от 0 до 700 Э [13]. Формула (2) справедлива для безгистерезисной $M(H)$. В случае гистерезиса намагниченности необходимо пользоваться другими формулами [14].

Используемые поликристаллы YBCO представляли собой цилиндры диаметром 5–20 мм и длиной 2–10 мм. Они были приготовлены по обычной технологии твердофазного синтеза и имели температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 91\text{--}93$ К и ширину перехода $\Delta T \approx 1\text{--}2$ К. Спектр выходного сигнала содержал в основном нечетные гармоники (рис. 2).

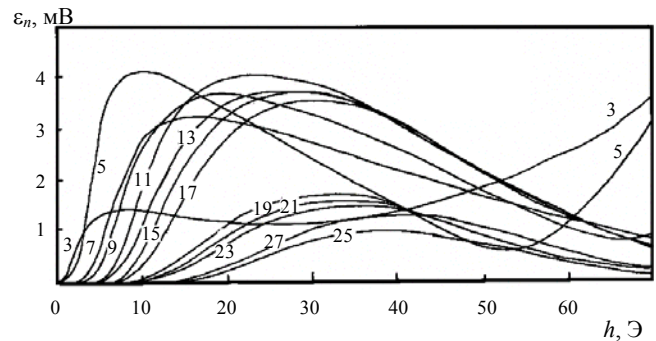


Рис. 2. Зависимость напряжений гармоник ϵ_n сигнала отклика поликристалла YBCO от амплитуды переменного магнитного поля. Цифрами обозначены номера гармоник

Амплитуды гармоник плавно спадают с ростом номера n гармоник. Амплитуды нечетных гармоник напряжения примерно на порядок больше амплитуд близких четных гармоник. Это объясняется тем, что при постоянном магнитном поле $H_0 = 0$ четные гармоники не наблюдаются вследствие нечетной симметрии петли гистерезиса намагниченности [14, 15]. При $H_0 \neq 0$ симметрия петли гистерезиса $M(H)$ нарушается и появляются дополнительно четные гармоники. Наличие даже незначительного постоянного магнитного поля, например поля Земли, приводит к появлению в сигнале отклика поликристалла слабых четных гармоник, что наблюдается на эксперименте. Нами наблюдались и изучались нечетные гармоники намагниченности образцов YBCO до номера $n = 27$ [12].

Полученные данные объясняются моделью критического состояния джозефсоновской среды [15, 16]. Результаты работ [8–13] указывают на высокую чувствительность амплитуд гармоник намагниченности ВТСП на основе поликристаллического YBaCuO к внешнему переменному магнитному полю. В этой связи проведенные исследования представляют большой интерес для использования указанных результатов в разработке формирователя гармоник (умножителя низких частот).

Принцип работы формирователя гармоник [17], как было указано выше, основан на нелинейных свойствах намагниченности поликристаллов ВТСП. Цель создания формирователя гармоник — расширение спектра формируемых гармоник, упрощение схемы, повышение эффективности и надежности работы на низких частотах ($\nu \leq 100$ кГц). Аналогом формирователя гармоник был умножитель частоты, нелинейным элементом которого является варикап [7].

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема формирователя гармоник; на рис. 4 — его конструктивное выполнение. Он содержит первую, вторую и третью катушки индуктивности, сердечник выполнен из поликристаллического ВТСП YBCO. Формирователь гармоник работает следующим образом. На катушку 1 подается синусоидальный сигнал заданной частоты. В результате взаимной индукции во второй и третьей катушках индуктивности, имеющих одинаковое число витков, индуцируются синусоидальные сигналы, одинаковые по амплитуде. Вторая и третья катушки индуктивности включены встречно, что компенсирует наве-

денные в них ЭДС при отсутствии сверхпроводящего сердечника. Таким образом, при отсутствии сверхпроводящего сердечника сигнала с входной частотой на выходе нет (см. рис. 3).

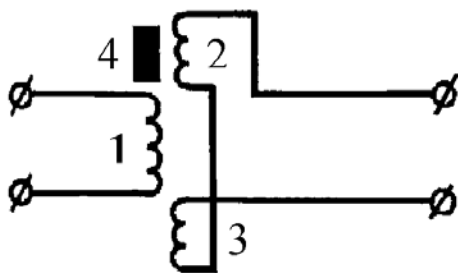


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема формирователя гармоник:
1 – катушка возбуждения; 2 и 3 – компенсационные (выходные) катушки; 4 – сердечник из поликристалла YBCO

При введении во вторую катушку индуктивности сердечника из поликристалла YBCO отклик сигнала из-за нелинейности намагниченности сердечника будет иметь сложную форму (см. рис. 1). Так как входной сигнал (в отсутствие сердечника) скомпенсирован и на выходе формирователя гармоник отсутствует, то при введении сердечника выходной сигнал будет полностью определяться его влиянием. На концах катушек 2 и 3 наводится негармоническая ЭДС, пропорциональная производной намагниченности по времени (1). Таким образом, из синусоидального сигнала, поданного на вход формирователя гармоник, формируется совокупность гармоник, частоты которых соответствуют умножению входной частоты в нечетное число раз. Амплитуды гармоник плавно убывают с ростом коэффициента умножения. Эффективность работы формирователя гармоник, вплоть до больших кратностей умножения (до $n = 27$ в нашем случае), определяется именно достаточно плавным уменьшением амплитуд гармоник с ростом их номера.

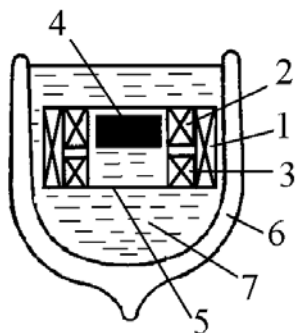


Рис. 4. Конструкция формирователя гармоник в криостате:
1 – катушка возбуждения (входная); 2 и 3 – выходные катушки индуктивности; 4 – сердечник из ВТСП YBCO; 5 – немагнитный диэлектрический каркас; 6 – криостат; 7 – жидкий азот

Формирователь гармоник может использоваться как при малых (~1 мкВт), так и при больших (~100 кВт и более) мощностях, т. е. он обладает широким динамическим диапазоном. Динамический диапазон в основ-

ном ограничивается допустимым током входной катушки, а не сверхпроводящим сердечником, который может работать вплоть до разрушения сверхпроводящего состояния. Формирователь гармоник работает в интервале температур, при которых сердечник является сверхпроводником, в связи с чем он помещен в криостат, наполненный охлаждающим агентом (см. рис. 4). При этом первая, вторая и третья катушки индуктивности расположены соосно на диэлектрическом немагнитном каркасе, предохраняющем их от взаимного перемещения. В качестве хладагента можно использовать жидкий азот (температура кипения $T_N \approx 77$ К). В этом случае для обеспечения сверхпроводимости сердечника из поликристаллического YBCO достаточно обыкновенного термоса или любого другого простого устройства. Данный формирователь гармоник можно применять в криогенной электронике на основе ВТСП, которая в последнее время быстро развивается [2].

При работе в переменных магнитных полях с амплитудами $h \leq 10-20$ Э разработанный формирователь гармоник не обнаруживает гистерезисных свойств, связанных с захватом магнитного потока, и поэтому не нужно переводить сверхпроводящий сердечник после каждой операции в нормальное состояние. В случае попадания данного устройства в переменные магнитные поля с амплитудами $h > 20-50$ Э сверхпроводящий сердечник (YBCO поликристалл) захватывает магнитный поток, и амплитуды гармоник намагниченности несколько снижаются [8]. Амплитуды гармоник можно восстановить путем перевода сердечника YBCO в нормальное состояние. Однако возможно использование данного формирователя гармоник и в случае захвата сердечником магнитного потока, не переводя сердечник в нормальное состояние, так как нелинейные свойства намагниченности сохраняются [8, 12, 13]. Следовательно, значительные перегрузки не влияют на надежную работу такого формирователя гармоник. Длительная эксплуатация сверхпроводящего сердечника приводит к постепенной деградации его сверхпроводимости и, соответственно, нелинейных магнитных свойств. В этом случае можно сделать автоматическую подстройку формирователя гармоник (подстройку амплитуд высших гармоник).

Таким образом, разработанный формирователь гармоник на основе поликристаллического ВТСП YBCO проще конструктивно, обладает большим спектром формируемых гармоник ($n = 27$ и более) на низких, высоких и сверхвысоких частотах, имеет широкий динамический диапазон, практически надежен при любых амплитудах входного сигнала. Динамические свойства в мощных электронных устройствах являются решающими. По всем указанным характеристикам разработанный формирователь гармоник превосходит соответствующие аналоги.

Рассматриваемый формирователь гармоник ввиду вышеперечисленных уникальных свойств может быть использован для умножения частоты в радиоизмерительной аппаратуре, в криогенной электронике и других прикладных областях. Он может также применяться в сочетании с полу-

проводниковыми приборами или устройствами для улучшения их параметров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16455) РАН и Минобрнауки.

Литература

1. Гинзбург В. Л.//УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 619.
2. Черноплеков Н. А.//Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 4. С. 303.
3. Лутидзе Ш. И., Джафаров Э. А. Сверхпроводящие трансформаторы. – М.: Научтехлитиздат, 2002.
4. Lindgren M., Zorin M.A., Trifonov V. et al.//Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. № 26. P. 3398.
5. Головашкин А. И., Васютин М. А., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В.: Препринт № 11. — М.: ФИАН. 1992.

6. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Васютин М. А., Головашкин А. И., Левченко И. С., Мотулевич Г. П. Датчик магнитного поля. Патент 1827653 от 23.03.93 г.
7. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский А. С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1972.
8. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В.: Препринт № 41. — М.: ФИАН. 1989.
9. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В.: Препринт № 151. – М.: ФИАН. 1989.
10. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В.//ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 233.
11. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В.//Там же. 1990. Т. 32. № 5. С. 1374.
12. Славкин В. В.//Деп. в ВИНТИ. 28.01.92. № 271-В92.
13. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В.//Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 8. С. 11.
14. Кузьмичев Н. Д.//ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 22. С. 63.
15. Кузьмичев Н. Д.//Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. В. 5. С. 291.
16. Кузьмичев Н. Д.//ФТТ. 2001. Т. 43. С. 1934.
17. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Полежайкин Г. М. Формирователь гармоник: А. с. 1612932 от 8.08.2000 г.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2006 г

Former of harmonics on the base of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ polycrystals

A. I. Golovashkin

P. N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

N. D. Kuzmichev

N. P. Ogarev Mordvinian State University, Saransk, Russia

V. V. Slavkin

Saransk Cooperative Institute of Central Union RF, Saransk, Russia

The device—former of harmonics—was developed on the base of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ polycrystals. Nonlinear magnetic properties of this high temperature superconductor were used in the device. The device makes it possible to form the wide harmonics spectrum. Amplitudes of the high harmonics are smoothly decreased with increasing the harmonics number. Proposed device has the wide dynamic range, simpler in construction and more reliable than available devices.