

05:09

## Формирование гармоник с помощью высокотемпературных сверхпроводящих поликристаллов иттриевого купрата

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

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия  
E-mail: golov@sci.lebedev.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2006 г.)

На основе исследований нелинейных магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводящих поликристаллов  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  разработан формирователь гармоник, обладающий широким спектром формируемых гармоник. Показано, что амплитуды высших гармоник плавно уменьшаются с увеличением номера гармоники. Разработанное устройство имеет широкий динамический диапазон, проще конструктивно и более надежно по сравнению с имеющимися устройствами.

PACS: 85.75.Ss, 07.55.Ge

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости появилась возможность 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 применения в различных областях слаботочной прикладной сверхпроводимости. При этом если для многих физических исследований необходимы качественные пленки или монокристаллы ВТСП, то для целого ряда приложений более важна простота изготовления поликристаллических образцов. Одним из основных рабочих ВТСП-материалов современной сверхпроводниковой электроники является соединение  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO), достаточно легко синтезируемое и стабильное [2].

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 перспективным 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  $B < 10^{-4}$  Т.

Ранее в наших работах [8–13] исследовались нелинейные свойства поликристаллов YBCO, в частности их нелинейный магнитный отклик на синусоидальное низкочастотное (частота  $\nu < 10^4$  Hz) 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 исследовании нелинейных свойств поликристаллов YBCO и разработке формирователя гармоник в настоящей работе использовался двухкатушечный 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 находилась образец. Сигнал отклика с выходных катушек подавался на вход селективного вольтметра. ЭДС  $\varepsilon$  сигнала отклика, возникающая во

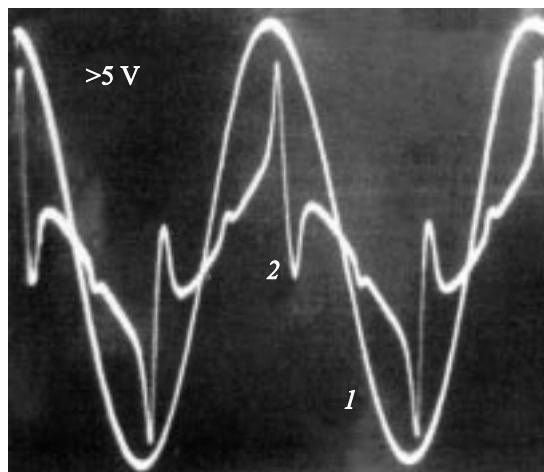
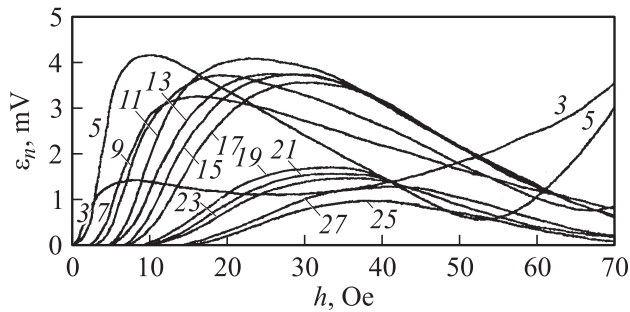


Рис. 1. Входной синусоидальный сигнал (1) и выходной сигнал отклика поликристалла YBCO (2).



**Рис. 2.** Зависимость напряжений гармоник  $\varepsilon_n$  сигнала отклика поликристалла YBCO от амплитуды напряженности переменного магнитного поля; цифрами обозначены номера гармоник.

вторичных катушках, описывается выражением

$$\varepsilon(t) = -\mu_0 NS(dM/dt). \quad (1)$$

Здесь  $M$  — намагниченность образца,  $S$  — сечение образца,  $N$  — число витков приемной катушки,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/м — магнитная постоянная,  $t$  — время.

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

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

Здесь  $n$  — номер гармоники;  $\varepsilon_n$  — 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 напряженности переменного магнитного поля  $h$  от 0 до 700 Ое [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 и длиной 2–10 мм. Они были приготовлены по обычной технологии твердофазного синтеза и имели температуру перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c = 91$ –93 К и ширину перехода  $\Delta T \approx 1$ –2 К. Спектр выходного сигнала содержал в основном нечетные гармоники (рис. 2).

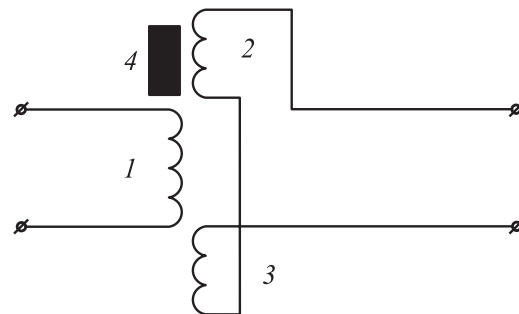
Амплитуды гармоник плавно спадают с ростом номера  $n$  гармоник. Амплитуды нечетных гармоник напряжения примерно на порядок больше амплитуд близких четных гармоник. Это объясняется тем, что при постоянном магнитном поле  $H_0 = 0$  четные гармоники не наблюдаются вследствие нечетной симметрии петли 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].

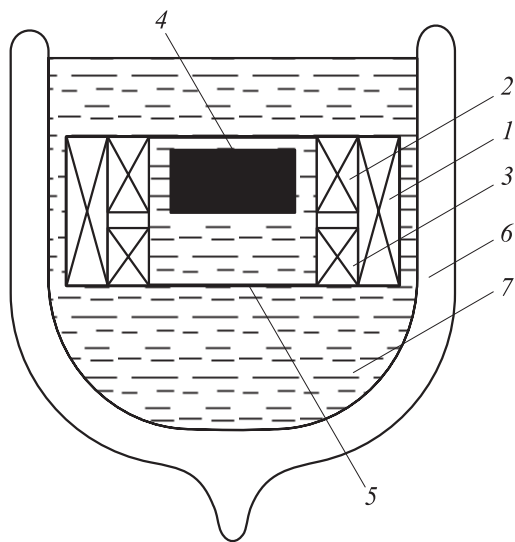
Полученные данные объясняются на основе модели критического состояния джозефсоновской среды [15,16]. Результаты работ [8–13] указывают на высокую чувствительность амплитуд гармоник намагниченности ВТСП на основе поликристаллического YBCO к внешнему переменному магнитному полю. В этой связи проведенные 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. Целью создания формирователя гармоник являлось расширение спектра формируемых гармоник, упрощения схемы, повышения эффективности и надежности работы на низких частотах ( $\nu \leq 100$  kHz). В качестве аналога формирователя гармоник был взят 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 (1), вторую (2) и третью (3) катушки индуктивности, сердечник (4) выполнен из поликристаллического высокотемпературного сверхпроводника YBCO. Формирователь гармоник работает следующим образом. На катушку 1 подается синусоидальный сигнал заданной частоты. В результате взаимной индукции во второй (2) и третьей (3) катушках индуктивности, имеющих одинаковое количество витков, индуцируются синусоидальные сигналы, одинаковые по амплитуде. Катушки индуктивности (2 и 3) включены встречно, что компенсирует наведенные в них ЭДС при отсутствии сверхпроводящего сердечника 4. Таким образом, при отсутствии сверх-



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



**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.

проводящего сердечника сигнала с входной частотой на выходе нет (рис. 3).

При введении во вторую катушку индуктивности 2 сердечника 4 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 4 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 на нечетное число. 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.

Формирователь гармоник может использоваться как при малых ( $\sim 1$  мкВт), так и при больших ( $\sim 100$  кВт и более) мощностях, т.е. он обладает широким динамическим диапазоном. Динамический диапазон в основном 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 6, наполнен-

ный охлаждающим агентом 7 (рис. 4). При этом первая (1), вторая (2) и третья (3) катушки индуктивности расположены соосно на диэлектрическом немагнитном каркасе 5, 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, которая в последнее время быстро развивается на основе ВТСП [2].

При работе в переменных магнитных полях с амплитудами напряженности  $h \leq 10-20$  Ое 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  $h > 20-50$  Ое сверхпроводящий сердечник (поликристалл YBCO) захватывает магнитный поток, и амплитуды гармоник намагниченности несколько снижаются [8]. Амплитуды гармоник можно восстановить путем перевода сердечника YBCO в нормальное состояние. Однако можно использовать данный формирователь 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 на основе исследования нелинейных свойств поликристаллических ВТСП YBCO-формирователь гармоник оказывается проще конструктивно, обладает богатым спектром формируемых гармоник ( $n = 27$  и более) на низких, высоких и сверхвысоких частотах, имеет широкий динамический диапазон, надежен практически 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 вышперечисленных уникальных свойств может быть использован для умножения частоты в радиоизмерительной аппаратуре, в криогенной электронике и других прикладных областях. Он может также использоваться в сочетании с полупроводниковыми приборами или устройствами для улучшения параметров последних.

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

## Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 619–630.
- [2] Черноплеков Н.А. // Вестн. РАН. 2001. Т. 71. № 4. С. 303–312.
- [3] Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы. М.: Научтехлитиздат, 2002. 167 с.
- [4] Lindgren M., Zorin M.A., Trifonov V. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. N 26. P. 3398–3400.
- [5] Головашкин А.И., Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 11. М.: ФИАН, 1992. 9 с.
- [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.: Высш. шк., 1972. 448 с.
- [8] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 41. М.: ФИАН, 1989. 23 с.
- [9] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 151. М.: ФИАН, 1989. 26 с.
- [10] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 233–235.
- [11] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 5. С. 1374–1377.
- [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. Вып. 8. С. 11–15.
- [14] Кузьмичев Н.Д. // ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 22. С. 63–74.
- [15] Кузьмичев Н.Д. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. № 5. С. 291–295.
- [16] Кузьмичев Н.Д. // ФТТ. 2001. Т. 43. № 11. С. 1934–1938.
- [17] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В., Полежайкин Г.М. Формирователь гармоник. А.с. № 1612932 от 8.08.2000 г.