

05;12

Управление формированием гармоник на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

© А.И. Головашкин,¹ Н.Д. Кузьмичев,² В.В. Славкин³

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: golov@sci.lebedev.ru

² Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
431440 Рузаевка, Россия

³ Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ,
430027 Саранск, Россия

(Поступило в Редакцию 8 октября 2007 г.)

Выполнены исследования нелинейных магнитных свойств поликристаллов высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. На основе результатов исследований разработан метод управления амплитудами формируемых гармоник намагниченности и создано устройство — управляемый формирователь гармоник. Управление амплитудами гармоник производится с помощью изменения постоянного магнитного поля или тока. Использование поликристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ позволяет получать спектр с большим количеством высших гармоник. Устройство на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ обладает широким динамическим диапазоном, конструктивно просто и надежно в достаточно большом интервале амплитуд входного сигнала.

PACS: 74.25.No, 74.72.Bk, 85.25.Am

Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) благодаря своим уникальным свойствам становятся все более привлекательными в качестве материалов для применения в различных областях слаботочной прикладной сверхпроводимости [1–6]. Открытие ВТСП-материалов и совершенствование техники криостатирования стало мощным стимулом для разработок по сверхпроводниковой электронике и электротехнике и их практического использования в радиотехнике [7–11]. Если для физических исследований необходимы качественные монокристаллы и пленки ВТСП, то для целого ряда приложений можно использовать поликристаллические образцы, которые значительно проще изготовить. В некоторых случаях параметры поликристаллических образцов даже предпочтительнее соответствующих характеристик эпитаксиальных пленок и монокристаллов. Основным рабочим ВТСП-веществом современной сверхпроводниковой электроники является соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), хорошо синтезируемое и стабильное [2].

Известно, что в качестве умножителей частоты на практике широко применяются колебательные контуры, содержащие в качестве нелинейного элемента варикап [12,13]. Емкость варикапа зависит от амплитуды входного сигнала, и это 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 умножения частоты (10 раз и более). Умножитель частоты на основе варикапа имеет сложную электронную схему [12,13]. Наиболее перспективным методом повышения эффективности умножения частоты, получения широкого диапазона спектра, управления амплитудами формируемых

гармоник магнитным полем (или током), упрощения электронной схемы умножителя частоты является использование нелинейных магнитных свойств сверхпроводящего состояния ВТСП.

Эксперимент

Нами исследовался нелинейный магнитный отклик ВТСП поликристаллов YBCO на переменное магнитное поле с амплитудой напряженности $h \leq 70$ Ое при температуре $T = 78$ К [14–18]. Поликристаллические образцы YBCO изготавливались по обычной технологии твердофазного синтеза. Они представляли собой цилиндры диаметром 5–20 мм и длиной 2–10 мм, их температура перехода в сверхпроводящее состояние составляла $T_c = 91–93$ К, ширина перехода $\Delta T \approx 1–2$ К. Полученные нами результаты показывают, что при помещении поликристаллического образца YBCO во внешнее синусоидальное переменное магнитное поле откликом является сигнал сложной негармонической формы (рис. 1).

В работе нами использовался 2-катушечный компенсационный метод измерения намагниченности [14,17]. Синусоидальный сигнал подавался на входную катушку (катушку возбуждения). Внутри нее были расположены две одинаковые встречно намотанные выходные катушки индуктивности, в одной из которых находился сверхпроводник. Сигнал отклика с выходных катушек подавался на вход селективного вольтметра. Электродвижущая сила (ЭДС) сигнала отклика ε , возникающая на входных катушках, описывается выражением

$$\varepsilon(t) = -\mu_0 N S \frac{dM}{dt}. \quad (1)$$

Здесь $M = \int M dS dz$ — намагниченность образца; S — ориентированное сечение образца; \mathbf{M} — вектор намаг-

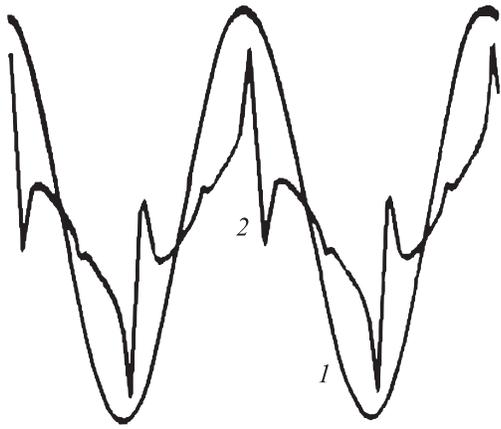


Рис. 1. Входной синусоидальный сигнал (1) и выходной сигнал отклика поликристалла YBCO (2).

ниченности образца в сечении S ; N — число витков приемной катушки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м — магнитная постоянная; z — координата в направлении S ; V — объем образца. Интегрирование проводится по объему V .

В работе исследовались напряжения гармоник ε_n , возникающие на выходных катушках при воздействии на образец YBCO переменного магнитного поля катушки возбуждения. Величины ε_n пропорциональны амплитудам гармоник намагниченности M_n

$$\varepsilon_n = \mu_0 N S n \omega M_n / \sqrt{2},$$

где $M_n = \sqrt{(M'_n)^2 + (M''_n)^2}$. Здесь M'_n , M''_n — действительная (синфазная) и мнимая (квадратурная) части гармоник намагниченности.

Для гистерезисного случая выражения M'_n и M''_n , согласно работам [19–21], имеют вид

$$M'_n(h, H_0) = 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!(m+n)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2m+n} \times \left(\frac{M_+(H_0) + M_-(H_0)}{2}\right)^{(2m+n)}. \quad (2)$$

Здесь $\left(\frac{M_+ + M_-}{2}\right)^{(2m+n)}$ — производная порядка $2m+n$ при $H = H_0$ от $\tilde{M} = \frac{M_+ + M_-}{2}$, величина $M_+(H_0)$ — намагниченность образца в возрастающем поле, а $M_-(H_0)$ — намагниченность в убывающем поле

$$\left\{ \begin{array}{l} M''_{2n} = \frac{2}{\pi} [M_-(H_0) - M_+(H_0)]^{(2m+1)} \\ \quad \times \frac{h^{2m+1}}{(2m+1)!} S(2m+1, 2n), \\ M''_{2n+1} = \frac{2}{\pi} [M_-(H_0) - M_+(H_0)]^{(2m)} \\ \quad \times \frac{h^{2m}}{(2m)!} S(2m, 2n+1). \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь:

$$S(m, n) = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{m!(n+m-2j-2)!!}{(m-j)!(n+m)!!}, \quad (4)$$

$k!! = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots$ для нечетных k и $k!! = 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \dots$ — для четных k , $[0!! = (-1)!! = 1]$.

Спектр выходного сигнала содержит в силу нечетной симметрии петли гистерезиса нечетные гармоники. Постоянное поле H_0 нарушает нечетную симметрию петли гистерезиса, и появляются четные гармоники. Изучались нечетные гармоники намагниченности образцов YBCO до номера $n = 27$ [18]. Найдено, что качественно зависимости $\varepsilon_n(h)$ одинаковы для всех гармоник. Основные особенности — максимум на кривой $\varepsilon_n(h)$ при малых амплитудах h , затем минимум и последующий рост ε_n . Амплитуды гармоник плавно спадают с ростом номера n гармоник. Наличие даже незначительного постоянного магнитного поля, например поля Земли, приводит к появлению в сигнале отклика поликристалла слабых по амплитуде четных гармоник, что наблюдалось на эксперименте. В работах [22,23] использовались амплитуды переменного магнитного поля h от 0 до 700 Ое.

Исследования нелинейности намагниченности поликристаллов YBCO с варьированием амплитуды h переменного ($h \leq 700$ Ое) и напряженности постоянного H_0 ($H_0 \leq 2$ кОе) магнитных полей выполнены также в работах [20,23–27]. Измерения проводились по методике, описанной выше, на специально созданной для этого случая установке при частоте $f = 540$ Гц. Образец охлаждался в нулевом магнитном поле до температуры жидкого азота, после чего включалось постоянное магнитное поле. Направления полей H_0 и h были соосными.

Полученные результаты работ показали, что зависимости $\varepsilon_n(H_0)$ ($n = 2, 3, 4, 5$ и т.д.) при сканировании поля в пределах от 0 до 20 Ое имеют осциллирующий вид, т.е. имеются максимумы и минимумы значений ε_n . Величина и положения осцилляций на кривой $\varepsilon_n(H_0)$ зависит от глубины модуляции поля. При больших значениях модуляции поля ($h > 100$ Ое) на $\varepsilon_n(H_0)$ также имеются максимумы и минимумы значений ε_n , которые при $H_0 > 600$ Ое начинают уменьшаться по величине. Характер поведения зависимостей $\varepsilon_n(H_0)$ при $h > 100$ Ое имеет качественное сходство с соответствующими зависимостями для магнитных полей H_0 , $h \leq 30$ Ое. Эти две области полей разделены некоторым интервалом (30–80 Ое), в котором нет резких осциллирующих зависимостей гармоник ε_n .

Результаты

Полученные данные объясняются на основе модели критического состояния среды Джозефсона [21,28]. Результаты настоящей работы и работ [14–18,20,22–27] указывают на высокую чувствительность амплитуд гармоник намагниченности ВТСП на основе YBCO к внешнему переменному и постоянному магнитному полю. В этой связи результаты проведенных фундаментальных

исследований являются весьма привлекательными для применения в различных областях электроники и электротехники.

Принцип работы разработанного устройства [29], как было указано выше, основан на нелинейных свойствах намагниченности поликристаллов $YBCO$. Целью создания управляемого формирователя гармоник является расширение спектра формируемых гармоник, управление амплитудами четных и нечетных гармоник, упрощение схемы, эффективности и надежности работы. Наиболее близким теоретическим решением данному устройству является формирователь гармоник [11]. Однако он неэффективен на четных гармониках и не позволяет управлять амплитудами спектра формируемых гармоник.

На рис. 2 показана принципиальная электрическая схема управляемого формирователя гармоник; на рис. 3 — его конструктивное выполнение. Он содержит первую, вторую, третью и четвертую катушки (1–4) индуктивности, сердечник 5, выполненный из поликристалла $YBCO$, криостат 6 и хладагент 7 (жидкий азот).

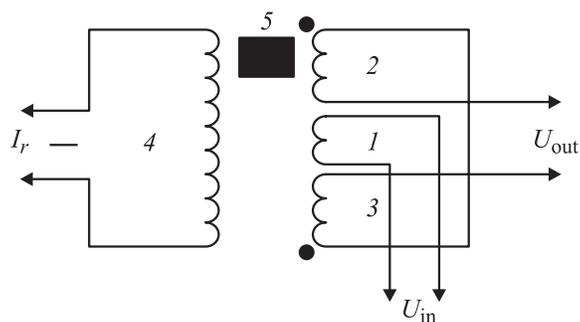


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема управляемого формирователя гармоник: 1 — катушек возбуждения; 2 и 3 — компенсационные (выходные) катушки; 4 — соленоид; 5 — сердечник из поликристалла $YBCO$, I_r — управляющий ток через соленоид, U_{in} — входное напряжение, U_{out} — выходное напряжение.

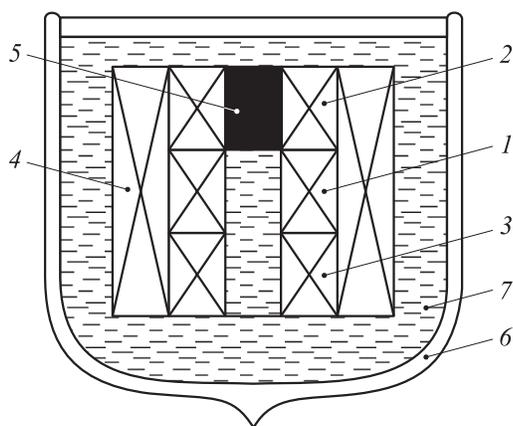


Рис. 3. Конструкция управляемого формирователя гармоник: 1 — катушка возбуждения (входная); 2 и 3 — выходные катушки индуктивности; 4 — соленоид; 5 — сердечник из ВТСП $YBCO$; 6 — криостат; 7 — жидкий азот.

Управляемый формирователь гармоник работает следующим образом. На первую катушку 1 индуктивности подается синусоидальный сигнал заданной частоты. В результате взаимной индукции во второй 2 и третьей 3 катушках индуктивности, имеющих одинаковое количество витков, индуцируются гармонические сигналы, одинаковые по амплитуде. Вторая и третья катушки индуктивности 2 и 3, кроме того, включены встречно, что компенсирует наведенные в них ЭДС при отсутствии сверхпроводящего сердечника 5. Поэтому сигнала с входной частотой на выходе нет. При введении во вторую катушку индуктивности 2 сердечника 5 из поликристалла $YBCO$ сигнал отклика из-за нелинейности намагниченности сердечника будет иметь сложную форму (рис. 1). Так как входной сигнал (в отсутствие сердечника) скомпенсирован и на выходе управляемого формирователя гармоник отсутствует, то при введении сердечника 5 выходной сигнал будет полностью определяться его откликом. На концах катушек 2 и 3 наводится явно негармоническая ЭДС, пропорциональная производной по времени намагниченности (1). Из этого следует эффективность работы данного устройства при больших кратностях умножения. Четные гармоники на выходе управляемого формирователя гармоник при отсутствии постоянного магнитного поля значительно слабее нечетных. При подаче на соленоид, которым является четвертая катушка 4, постоянного тока внутри соленоида создается постоянное магнитное поле, которое действует на ВТСП сердечник 5 и в результате с ростом величины напряженности магнитного поля амплитуды четных гармоник возрастают, а нечетных убывают (рис. 4, 5). Таким образом, из синусоидального сигнала, поданного на вход управляемого формирователя гармоник, формируются как нечетные, так и четные гармоники, амплитудами которых можно управлять постоянным магнитным полем, создаваемым соленоидом 4. Формируется широкий спектр гармоник, частоты которых соответствуют умножению входной частоты как в нечетное, так и в четное число раз в зависимости от величины управляющего магнитного поля, которое влияет на амплитуды четных и нечетных гармоник.

Управляемый формирователь гармоник может использоваться как при малых ($\sim 1 \mu W$), так и при больших ($\sim 100 kW$ 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. Он работает в интервале температур, при котором сердечник является сверхпроводником, в связи с чем он помещен в криостат 6, наполненный охлаждающим агентом 7. Первая 1, вторая 2 и третья 3 катушки индуктивности расположены соосно и плотно на диэлектрическом немагнитном каркасе так, что они предохранены от взаимного перемещения (рис. 3). В качестве хладагента можно использовать жидкий азот ($T_N \approx 78 K$). Поэтому для обеспечения сверхпроводимости сердечника (поликристалл $YBCO$) может служить обыкновенный термос или любое другое простое

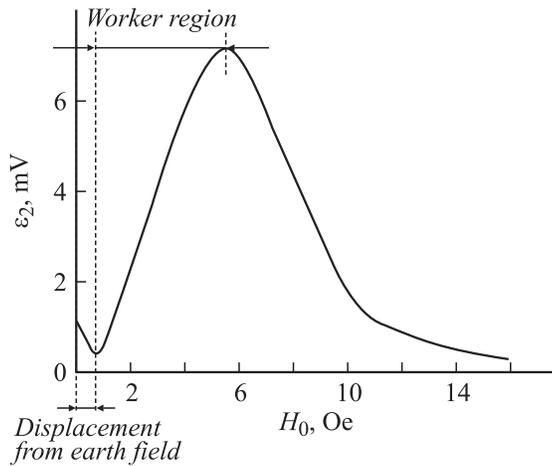


Рис. 4. Зависимость напряжения второй гармоники ε_2 сигнала отклика от величины напряженности постоянного магнитного поля H_0 . Амплитуда модуляции магнитного поля $h = 5$ Ое. Минимум в $\varepsilon_2(H_0)$ смещен из-за влияния магнитного поля Земли вправо.

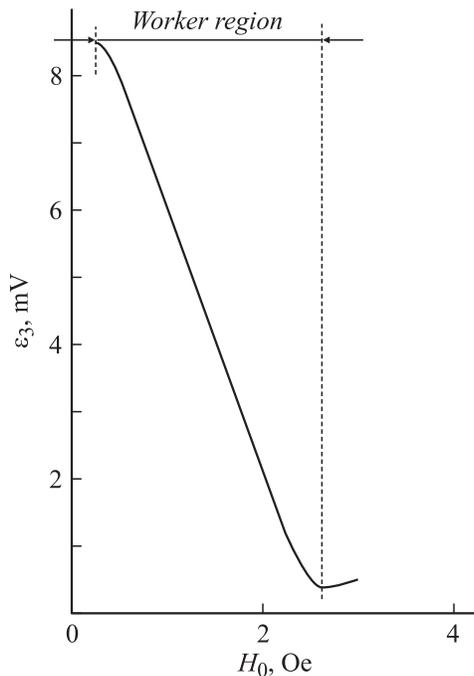


Рис. 5. Зависимость напряжения третьей гармоники ε_3 сигнала отклика от величины напряженности постоянного магнитного поля H_0 . Амплитуда модуляции магнитного поля $h = 5$ Ое. Максимум в $\varepsilon_3(H_0)$ смещен из-за влияния магнитного поля Земли вправо.

устройство. Храниться жидкий азот в термосе может несколько дней. Данное устройство можно применить в криогенной электронике, которая в последнее время на основе ВТСП быстро развивается [2].

При работе в относительно небольших постоянных и переменных магнитных полях H_0 , $h \leq 10-20$ Ое

управляемый формирователь гармоник гистерезисных свойств, связанных с захватом магнитного потока, не обнаруживает и поэтому не нужно переводить сверхпроводящий сердечник в нормальное состояние. В случае попадания данного устройства в более высокие магнитные поля H_0 , $h > 20-50$ Ое сверхпроводящий сердечник (YBCO-поликристалл) захватывает магнитный поток, и амплитуды гармоник намагниченности несколько снижаются [30]. Амплитуды гармоник можно восстановить путем перевода YBCO-сердечника в нормальное состояние. Можно также использовать управляемой формирователь гармоник в случае замороженного магнитного потока, не переводя сверхпроводящий сердечник в нормальное состояние.

Значительные перегрузки не влияют на надежную работу управляемого формирователя гармоник, так как нелинейные свойства намагниченности сердечника при этом сохраняются [30,31]. Длительная эксплуатация сверхпроводящего сердечника может приводить к постепенной деградации состояния его сверхпроводимости и соответственно нелинейных магнитных свойств. В этом случае можно применить устройство для автоматической подстройки управляемого формирователя гармоник (подстройки амплитуд высших гармоник).

Заключение

Таким образом, результаты проведенных нами исследований и изучения свойств разработанного устройства показывают, что управляемый формирователь гармоник на основе поликристаллического ВТСП YBCO:

- обеспечивает широкий спектр формируемых гармоник;
- позволяет управлять амплитудами четных и нечетных гармоник с помощью постоянного магнитного поля (или тока);
- имеет широкий динамический диапазон;
- прост конструктивно;
- надежен в широком интервале амплитуд входного сигнала.

Все эти характеристики превосходят соответствующие характеристики аналогов управляемого формирователя гармоник.

Разработанный управляемый формирователь гармоник ввиду вышеперечисленных уникальных свойств может быть использован для управления спектром формируемых гармоник с помощью магнитного поля и умножения частоты в радиоизмерительной технике, в криогенной электронике и других прикладных областях. Он может быть использован в сочетании с полупроводниковыми приборами или устройствами для улучшения параметров последних.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-02-16455), Минобрнауки и президиума РАН.

Список литературы

- [1] Гинзбург В.Л. УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 619.
- [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.
- [4] Lindgren M., Zorin M.A., Trifonov V. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65. N 26. P. 3398.
- [5] Иванов С.С. Сверхпроводимость: от фундаментальной науки к высоким технологиям нового века // Энергия. 1999. № 7.
- [6] Научная сессия МИФИ 2006. Сб. науч. трудов. Т. 4. М.: МИФИ, 2006. 300 с.
- [7] Мат. Первой Междунар. конф. „Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости“. Сборник расширенных тезисов. М.–Звенигород, 2004. 352 с.
- [8] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 125.
- [9] Головашкин А.И., Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 11. М.: ФИАН, 1992.
- [10] Патент № 1827653 от 23.03.93 г. Датчик магнитного поля / Н.Д. Кузьмичев, В.В. Славкин, М.А. Васютин, А.И. Головашкин, И.С. Левченко, Г.П. Мотулевич.
- [11] А.с. № 1612932 от 8.08.1990 г. Формирователь гармоник / Н.Д. Кузьмичев, В.В. Славкин, Г.М. Полежаикин.
- [12] Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский А.С. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1972.
- [13] А.с. № 523507. 1973.
- [14] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 41. М.: ФИАН, 1989.
- [15] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 151. М.: ФИАН, 1989.
- [16] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. // Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. по высокотемпературной сверхпроводимости. Киев, 1989. Т. 2. С. 52.
- [17] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 4. С. 233.
- [18] Славкин В.В. Деп. в ВИНТИ. 28.01.92. № 271–В92.
- [19] Кузьмичев Н.Д. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 12. С. 63.
- [20] Kuzmichev N.D., Slavkin V.V. // Physica C. 1994. Vol. 235–240. P. 2875.
- [21] Кузьмичев Н.Д. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. Вып. 5. С. 291.
- [22] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 11–15.
- [23] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Тез. докл. 24-го совещ. по физике низких температур. Казань, 1992. Т. 1. С. 181, 182.
- [24] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. Препринт № 163. М.: ФИАН, 1990.
- [25] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Левченко И.С., Мотулевич Г.П., Славкин В.В. // ФТТ. 1990. Т. 32. Вып. 5. С. 1374.
- [26] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Деп. в ВИНТИ. 28.12.91. № 4833–В91.
- [27] Kuzmichev N.D., Slavkin V.V. // Physica C. 1997. Vol. 282–287. P. 2091.
- [28] Кузьмичев Н.Д. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 8. С. 1934.
- [29] Патент 2013857 от 30.05.1994 г. Управляемый формирователь гармоник.
- [30] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Деп. в ВИНТИ. 18.02.91. № 796–В91.
- [31] Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // Деп. в ВИНТИ. 18.02.91. № 797–В91.