

6. Мюллер Э. Полевой ионный микроскоп с атомным зондом// В кн. Методы анализа поверхностей. — М.: Мир, 1979. С. 401—463.

7. Блок Дж., Зандерна А. Применение полевой ионной масс-спектрометрии при исследовании поверхности// Там же. С. 464—541.

8. Партенский М. Б. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности// УФН. 1979. Т. 128. Вып. 1. С. 69—106.

9. Партенский М. Б., Смородинский Я. Г. Проникновение электрического поля в металл и его влияние на величину поверхностного барьера// ФТТ. 1974. Т. 16. № 3. С. 644—647.

10. Усов В. Ф., Кобелева Р. М., Дедков Г. В., Темроков А. И. Электронно-статистическая теория металлов и ионных кристаллов. — М.: Наука, 1982. — 160 с.

11. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978. — 792 с.

Статья поступила в редакцию 30 января 2007 г.

Principal physics of handling the materials of the matter in contact to a material of a matter of other nature

Yu. K. Bobrov, E. I. Ostapenko

All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

V. A. Jangirov

Krzhizhanovsky's Power Institute, Moscow, Russia

Yu. Yu. Bobrov, K. Z. Rukhadze

Moscow Institute for Radio Engineering, Electronics and Automatics, Moscow, Russia

The single physical base was accepted to realize the contact friction and cutting as the limit form of friction and one matter processing another matter as to the technology procedures wide expanded all over the material processing. The method for calculation to surface metallic ion cohesive energy is proposed and the possibility of the metal-anode ion break-out by the external evaporating field derived experimentally found its theoretical background. The determining role of high electric fields arising in the thin contact transitive layers at the interfaces of the various nature matters? Which these fields play for the mass transport through the layers, is shown for wide range of natural and technological phenomena and processing.

УДК 537.312.62

Управляемый формирова́тель гармоник на основе поликристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Н. Д. Кузьмичев

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

В. В. Славкин

Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ, г. Саранск, Россия

А. И. Головашкин

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

На основе выполненных исследований нелинейных магнитных свойств поликристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ разработан управляемый формирова́тель гармоник (УФГ). С помощью данного устройства можно управлять постоянным магнитным полем или током амплитудами формируемых гармоник. УФГ конструктивно прост, имеет в спектре большое количество высших гармоник, обладает широким динамическим диапазоном и надежен практически при любых амплитудах входного сигнала.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) благодаря своим уникальным свойствам остаются привлекательными в качестве материала для при-

менений в различных областях слаботочной прикладной сверхпроводимости [1—6]. Открытие ВТСП-материалов и совершенствование техники

криостатирования стали 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, простые в изготовлении. В некоторых случаях параметры поликристаллических образцов предпочтительнее соответствующих характеристик эпитаксиальных пленок и монокристаллов. Основным рабочим ВТСП-веществом современной сверхпроводниковой электроники является соединение $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO), хорошо синтезируемое и стабильное [2].

Известно, что на практике в качестве умножителей частоты широко применяются колебательные контуры, содержащие в качестве нелинейного элемента варикап [12, 13]. Емкость варикапа зависит от амплитуды входного сигнала, и этим достигается умножение частоты. Однако он обладает малой емкостью и поэтому неэффективен на низких частотах. Кроме того, варикап ненадежен при больших значениях входного сигнала и при значительных кратностях умножения (~10 раз и более) частоты. Умножитель частоты на основе варикапа имеет сложную электронную схему [12, 13]. Наиболее перспективным методом повышения эффективности умножения частоты для широкого диапазона спектра управления амплитудами формируемых гармоник магнитным полем (или током), упрощения электронной схемы умножителя частоты является использование нелинейных магнитных свойств сверхпроводящего состояния ВТСП.

В работах [14—18] исследовался нелинейный магнитный отклик ВТСП поликристаллов YBCO на переменное магнитное поле с амплитудой напряженности $h \leq 70$ Э при температуре $T = 77$ К. Поликристаллические образцы YBCO изготавливались по обычной технологии твердофазного синтеза. Они представляли собой цилиндры диаметром 5—20 мм и длиной 2—10 мм и имели критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 91—93$ К с шириной перехода $\Delta T \approx 1—2$ К. Результаты вышеуказанных работ показывают, что при помещении поликристаллического образца YBCO во внешнее синусоидальное переменное магнитное поле откликом является сигнал сложной негармонической формы (рис. 1). 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 ко-

торых находился сверхпроводник. Сигнал отклика с выходных катушек подавался на вход селективного вольтметра. Электродвижущая сила (ЭДС) сигнала отклика ε , возникающая на входных катушках, описывается выражением

$$\varepsilon(t) = -\mu_0 NS \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

где $M = \frac{1}{V} \int \bar{M} d\bar{S} dz$ — намагниченность образца;

\bar{S} — ориентированное сечение образца;

\bar{M} — вектор намагниченности образца в сечении \bar{S} ;

N — число витков приемной катушки;

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

z — координата в направлении \bar{S} ;

V — объем образца.

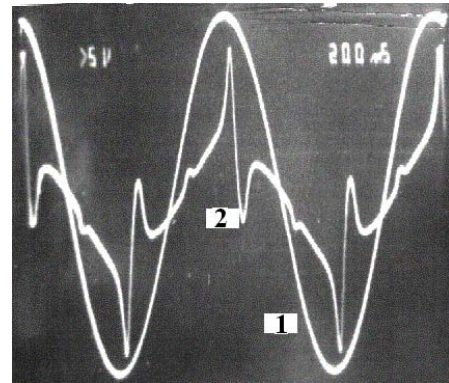


Рис. 1. Входной синусоидальный сигнал (1) и выходной сигнал отклика поликристалла YBCO (2)

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

$$\varepsilon_n = \mu_0 NS_n \omega M_n / \sqrt{2},$$

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

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} M_{2n}'' &= \frac{2}{\pi} [M_-(H_0) - M_+(H_0)]^{2m+1} \times \\ &\times \frac{h^{2m+1}}{(2m+1)!} S(2m+1, 2n); \\ M_{2n+1}'' &= \frac{2}{\pi} [M_-(H_0) - M_+(H_0)]^{2m} \times \\ &\times \frac{h^{2m}}{(2m)!} S(2m, 2n+1), \end{aligned} \right.$$

где

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

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

Спектр выходного сигнала в силу нечетной симметрии петли гистерезиса содержит 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 в эксперименте. В работах [22, 23] использовались амплитуды переменного магнитного поля h от 0 до 700 Э.

Более подробные исследования нелинейности намагниченности поликристаллов YBCO с варьированием амплитуды h переменного ($h \leq 700$ Э) и напряженности постоянного H_0 ($H_0 \leq 2$ кЭ) магнитных полей выполнены в работах [20, 24–28]. Измерения проводились по методике, описанной выше, на специально созданной для этого случая установке на частоте $f = 540$ Гц. Образец охлаждали в нулевом магнитном поле до температуры жидкого азота, после чего включали постоянное магнитное поле. Направления полей \vec{H}_0 и \vec{h} были соосными. Полученные результаты работ показа-

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

Полученные данные объясняются на основе модели критического состояния среды Джозефсона [21, 29]. Результаты работ [14–18, 20, 22–28] указывают на высокую чувствительность амплитуд гармоник намагниченности ВТСП на основе YBCO к внешнему переменному и постоянному магнитному полю. В этой связи проведенные фундаментальные исследования являются весьма привлекательными для применений в различных областях электроники и электротехники.

Принцип работы разработанного устройства [30], как указано выше, основан на нелинейных свойствах намагниченности поликристаллов YBCO. Цель создания управляемого формирователя гармоник — расширение спектра формируемых гармоник, управление амплитудами четных и нечетных гармоник, упрощение схемы, эффективности и надежности работы. Наиболее близким техническим решением к 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. Формирователь гармоник содержит первую, вторую, третью и четвертую катушки индуктивности, сердечник, выполненный из поликристалла YBCO, криостат и хладагент (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. Поэтому сигнала с входной частотой на выходе нет.

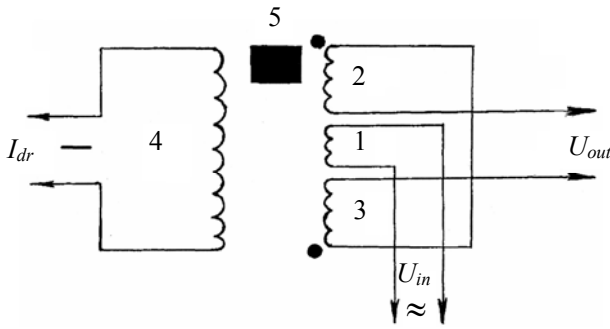


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема управляемого формирователя гармоник:

1 — катушка возбуждения; 2 и 3 — компенсационные (выходные) катушки; 4 — соленоид; 5 — сердечник из поликристалла YBCO

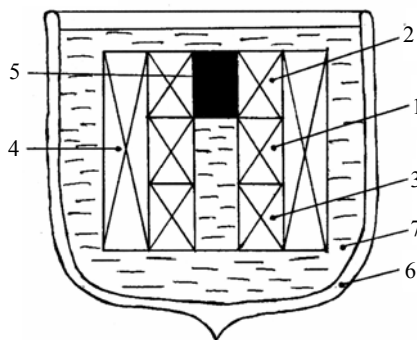


Рис. 3. Конструкция управляемого формирователя гармоник:

1 — катушка возбуждения (входная); 2 и 3 — выходные катушки индуктивности; 4 — соленоид; 5 — сердечник из ВТСП YBCO; 6 — криостат; 7 — жидкий азот

При введении во вторую катушку индуктивности 2 сердечника из поликристалла YBCO отклик сердечника из-за нелинейности намагниченности будет иметь сложную форму (см. рис. 1). Так как входной сигнал (в отсутствие сердечника) скомпенсирован и на выходе управляемого формирователя гармоник отсутствует, то при введении сердечника 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 значительно слабее нечетных. Вследствие подачи на соленоид, которым является четвертая катушка 4, постоянного тока внутри него создается постоянное магнитное поле, которое действует на ВТСП-сердечник, и в результате с ростом величины напряженности магнитного поля амплитуды четных гармоник возрастают, а нечетных убывают (рис. 4, 5). Таким образом, из синусоидального сигнала, по-

данного на вход управляемого формирователя гармоник, формируются как нечетные, так и четные гармоники, амплитуды которых управляются постоянным магнитным полем, создаваемым соленоидом. 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.

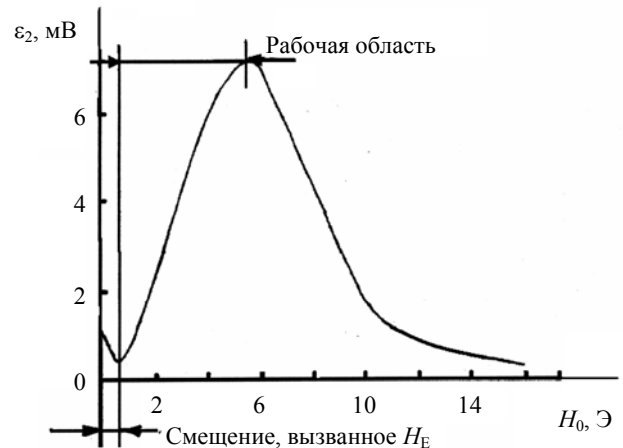


Рис. 4. Зависимость напряжения второй гармоники ε_2 сигнала отклика от величины напряженности постоянного магнитного поля H_0 .

Амплитуда модуляции магнитного поля $h = 5$ Э. Минимум в $\varepsilon_2(H_0)$ смещен на величину магнитного поля Земли H_E вправо

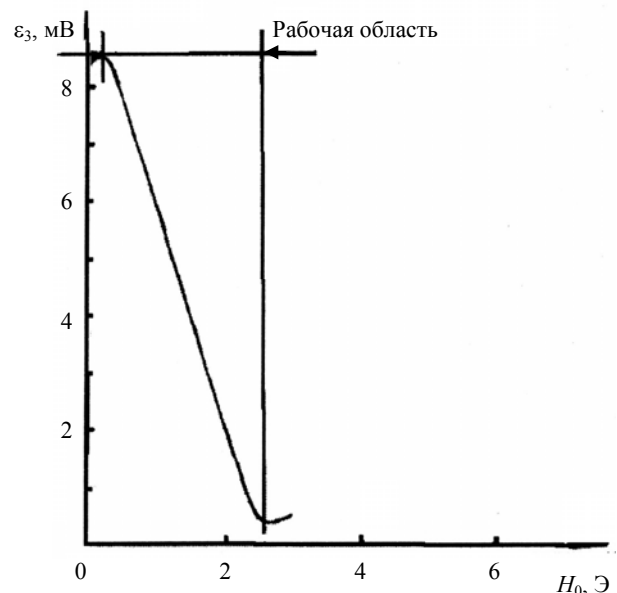


Рис. 5. Зависимость напряжения третьей гармоники ε_3 сигнала отклика от величины напряженности постоянного магнитного поля H_0 .

Амплитуда модуляции магнитного поля $h = 5$ Э. Максимум в $\varepsilon_3(H_0)$ смещен на величину магнитного поля Земли H_E вправо

Управляемый формирователь гармоник может использоваться как при малых (~ 1 мкВт), так и при больших мощностях (~ 100 кВт и более), 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, наполненный охлаждающим агентом. Первая 1, вторая 2 и третья 3 катушки индуктивности расположены соосно и плотно на диэлектрическом немагнитном каркасе так, что они предохранены от взаимного перемещения (см. рис. 3). В качестве хладагента возможно использование жидкого азота ($T_{N_2} \approx 77$ К). Поэтому для обеспечения сверхпроводимости сердечника (поликристалл YBCO) может применяться обыкновенный термос или любое другое простое устройство. Жидкий азот в термосе может храниться несколько дней. Данное устройство может найти применение в криогенной электронике, которая в последнее время на основе ВТСП быстро развивается [2].

При работе в постоянных и переменных магнитных полях H_0 , $h \leq 10-20$ Э 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 магнитные поля H_0 , $h > 20-50$ Э сверхпроводящий сердечник (YBCO-поликристалл) захватывает магнитный поток, и амплитуды гармоник намагниченности несколько снижаются [31]. Амплитуды гармоник можно восстановить путем перевода YBCO-сердечника в нормальное состояние. Можно также использовать управляемый формирователь гармоник в случае замороженного магнитного потока, не переводя сверхпроводящий сердечник в нормальное состояние, так как нелинейные свойства намагниченности сохраняются [31, 32]. Следовательно, значительные перегрузки не влияют на надежную работу управляемого формирователя гармоник. Длительная эксплуатация сверхпроводящего сердечника приводит к постепенной деградации его сверхпроводимости и, соответственно, нелинейных магнитных свойств. В этом случае можно применить устройство для автоматической подстройки управляемого формирователя гармоник (подстройки амплитуд высших гармоник).

Из вышеизложенного следует, что управляемый формирователь гармоник, разработанный на основе поликристаллического ВТСП YBCO, обеспечивает расширение спектра формируемых гар-

моник и управление амплитудами четных и нечетных гармоник с помощью постоянного магнитного поля (или тока), а также имеет широкий динамический диапазон, проще конструктивно, надежен практически при любых амплитудах входного сигнала. Динамические свойства в мощных электронных устройствах являются основным качеством. Всеми этими характеристиками не обладают аналоги управляемого формирователя гармоник.

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

Л и т е р а т у р а

1. Гинзбург В. Л.// УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 619.
2. Черноплеков Н. А.// Вестник 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. V. 65. № 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. тр. Т. 4. — М.: МИФИ, 2006. — 300 с.
7. Первая международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости”// Сб. 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. Датчик магнитного поля/ Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Васютин М. А., Головашкин А. И., Левченко И. С., Мотулевич Г. П.
11. А. с. 1612932 от 8.08.1990. Формирователь гармоник/ Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Полежайкин Г. М..
12. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский А. С. Теоретические основы электротехники. — М.: Высш. шк., 1972.
13. А. с. СССР 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 Всес. 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. № 4. С. 233.
18. Славкин В. В.// Деп. 28.01.92. № 271-B92/ ВИНТИ.
19. Кузьмичев Н. Д.// ЖТФ. 1994. Т. 64. В.12. С. 63.
20. Kuzmichev N. D., Slavkin V. V.// Physica C. 1994. V. 235—240. P. 2875.

21. Кузьмичев Н. Д. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. В. 5. С. 291.
 22. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Там же. 1992. Т. 18. № 8. С. 11—15.
 23. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Тез. докл. 24-го совещания по физике низких температур. — Казань. 1992. Т. 1. С. 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. № 5. С. 1374.
 26. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В.: Деп. 28.12.91. № 4833 – В91/ВИНИТИ.
 27. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Тез. докл. 24-го совещания по физике низких температур. — Казань. 1992. Т. 1. С. 181.
 28. Kuzmichev N. D., Slavkin V. V. // Physica C. 1997. V. 282—287. P. 2091.
 29. Кузьмичев Н. Д. // ФТТ. 2001. Т. 43. С. 1934.
 30. Пат. 2013857 от 30.05.1994 г. Управляемый формирователь гармоник.
 31. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Деп. 18.02.91. № 796—В91/ВИНИТИ.
 32. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В. // Деп. 18.02.91. № 797—В91/ВИНИТИ.

Статья поступила в редакцию 29 августа 2006 г.

The drive form of harmonics on based of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ polycrystals

N. D. Kuzmichev

The Mordovian State University, Saransk, Russia

V. V. Slavkin

Saransk Cooperative Institute, Saransk, Russia

A. I. Golovashkin

Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The drive form of harmonics (DFH) work out on based executed researches of nonlinear magnetic properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ polycrystals. By dc magnetic field and direct current can drive of the work out device. The DFH is simpler. He has wide spectra and wide range of form amplitude of harmonics.

УДК 539.2

Коэффициент поглощения расплава оксида алюминия

В. К. Битюков, В. А. Петров

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет)”, Москва, Россия

Выполнен анализ имеющихся экспериментальных данных по спектральной и температурной зависимости коэффициента поглощения расплава оксида алюминия в области полупрозрачности и результатов их аппроксимации. Рассмотрены основные физико-химические процессы, влияющие на величину коэффициента поглощения. Показано, что всю совокупность данных можно разбить на две большие группы, различающиеся по уровню поглощения, однако сделать обобщения в пределах каждой из групп не представляется возможным вследствие большого разброса величин.

Исследование температурной и спектральной зависимости коэффициента поглощения α расплава оксида алюминия Al_2O_3 представляет большой научный и практический интерес. Научный интерес обусловлен тем, что оксид алюминия при плавлении очень сильно изменяет свои физические свойства. Электропроводность, например, увеличивается на три порядка величины, а плот-

ность уменьшается более чем на 20 %. При затвердении капель оксида алюминия малых размеров возможны значительное их переохлаждение, достигающее сотен кельвинов, а также образование метастабильных кристаллических фаз. Практический интерес связан с широким использованием выращиваемых из расплавов монокристаллов корунда в различных областях электроники, полу-