

А.Г. АКОПЯН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Реализован теоретический анализ характеристик фильтров на основе высокотемпературных сверхпроводящих тонких пленок в режиме неболометрического поглощения. Показано, что этими характеристиками можно управлять, изменяя интенсивность оптического сигнала. Разработано программное обеспечение, на основе которого получены расчеты характеристик фильтров.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, фильтры, четырехполюсники.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и развитие технологии их получения в виде тонких пленок позволяют реализовать чувствительные СВЧ устройства: оптически управляемых фильтров, фильтров-выключателей, линий задержки, смесителей и детекторов, фильтров-ограничителей, параметрических преобразователей, усилителей и других активных и пассивных цепей. В последние годы заметный интерес проявляется к изучению свойств ВТСП при воздействии на него лучистой энергии (лазерного излучения, инфракрасного возбуждения и т.д.). Взаимодействие фотонов с энергетической щелью в ВТСП пленках и неболометрический распад пары сверхпроводящих электронов могут быть использованы для создания оптически управляемых СВЧ приборов, принцип действия которых основан на изменении СВЧ импедансных параметров под влиянием оптического излучения. Многочисленные экспериментальные и теоретические результаты подтверждают, что доминирующим механизмом поглощения ВТСП материалов оптического излучения является болометрический. Однако при определенных параметрах оптического излучения и состоянии образца могут реализовываться и неболометрические механизмы поглощения [1].

Особенно привлекает возможность оптического "управления" кинетической индуктивностью. Поскольку последняя связана с движением электронов, то появляется возможность управления ею благодаря зависимости числа сверхпроводящих и нормальных электронов и скорости их движения не только от температуры и транспортного тока, но и от других внешних воздействий, например, оптического излучения [2]. На основе неболометрического механизма поглощения ВТСП пленкой оптического излучения, в рамках двухжидкостной модели (рис.1), впервые теоретически показано, что при таком механизме поглощения можно "управлять" составляющими СВЧ поверхностного импеданса ВТСП пленок оптическим сигналом.

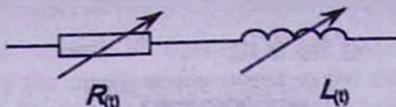


Рис.1. Эквивалентная схема ВТСП

Из теории ВТСП известно, что эквивалентная схема ВТСП состоит из активного поверхностного сопротивления R_{s0} и кинетической индуктивности L_{s0} .

Согласно [3], если на ВТСП пленку падает модулированный по интенсивности оптический сигнал $\Phi = \frac{\Phi_0}{2}(1 + \sin \omega_s t)$, где Φ_0 - интенсивность падающего излучения; ω_s - частота модуляции; t - время, то активная и реактивная составляющие поверхностного СВЧ импеданса могут модулироваться по закону "накачки", т.е.

$$R_{s\Phi}(t) \cong R_{s0}(t_c)(1 + m_R \sin \omega_s t), \quad L_{s\Phi}(t) \cong L_{s0}(t_c)(1 + m_L \sin \omega_s t) \quad (1)$$

для тонкой пленки толщиной $d \ll \lambda_L$, $t_c = T/T_c < 1$, где T_c - критическая температура; m_R и m_L - глубины модуляции высокочастотного активного поверхностного сопротивления и кинетической индуктивности; R_{s0} , L_{s0} - активная и реактивная составляющие поверхностного СВЧ импеданса до "накачки"; λ_L - глубина лондоновского проникновения.

Следовательно, при разработке различных параметрических схем можно использовать периодическую зависимость изменения активного поверхностного сопротивления и кинетической индуктивности от частоты модулирующего оптического сигнала.

В предлагаемой работе впервые сделана попытка описания характеристик Γ -образных высокочастотных, полосовых и заграждающих фильтров на основе ВТСП пленок при неболометрическом механизме поглощения оптического сигнала.

Известно [4], что любой сложный четырехполюсник можно представить соединением простых четырехполюсников.

Четырехполюсниковую систему с передаточными уравнениями можно представить в виде матрицы. При каскадном соединении матрицы четырехполюсников суммируются. При параллельном порядке четырехполюсников матрицы умножаются. Эти правила верны для любых количеств четырехполюсников [4].

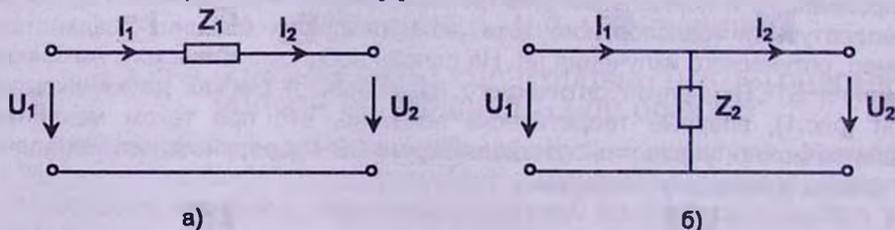


Рис. 2. Простые четырехполюсники, на основе которых формируются сложные четырехполюсники

Пользуясь законами Кирхгофа, для схемы рис.2 можно написать $U_1=U_2+I_2Z_1$ и $I_1=I_2$. Превращая эти уравнения в параметры матрицы А, получим

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}.$$

Для второго простого четырехполюсника имеем $U_1=U_2$ и $I_1=U_2/Z_2+I_2$. Отсюда следует

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_2 & 1 \end{Bmatrix}.$$

Г-образный четырехполюсник представляется двумя простыми четырехполюсниками, соединенными каскадным способом:

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_2 & 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1+Z_1/Z_2 & Z_1 \\ 1/Z_2 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Таким же способом выводятся П-образные и смещенные четырехполюсники, при этом параметры мостовых и смещенных четырехполюсников соединены не только каскадным, но и параллельным и последовательным способами:

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_2 & 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1+Z_1/Z_2 & Z_1 \\ 1/Z_2 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Учитывая (2)-(4) и результаты работы [1], для передаточной функции 8-звеньевых полосовых и заграждающих (режекторных) фильтров на основе ВТСП получим

$$K = \frac{1}{\left[\left(\left(1 + \frac{z_1}{z_2} \right)^2 + \frac{z_1}{z_2} \right)^2 + \frac{z_1}{z_2} \left(2 + \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \right]^2 + \frac{z_1}{z_2} \left(2 + \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left[\left(1 + \frac{z_1}{z_2} \right)^2 + 2 \frac{z_1}{z_2} + 1 \right]^2},$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{((1 - \omega^2 \cdot c \cdot L_s)^2 + R_1^2 \cdot \omega^2 \cdot c^2)}{\omega \cdot c \cdot \sqrt{(\omega \cdot L_{s\phi})^2 + R_1^2}},$$

где R_1, L, C - соответственно сопротивление, индуктивность и емкость линии единичной длины; z_1 и z_2 - сопротивления параллельного и последовательного звеньев четырехполюсника.

Расчеты сделаны программным обеспечением "Quadripole", разработанным автором, при помощи которого можно рассчитать любую четырехполюсниковую схему на основе ВТСП. Алгоритм представлен на рис. 3.

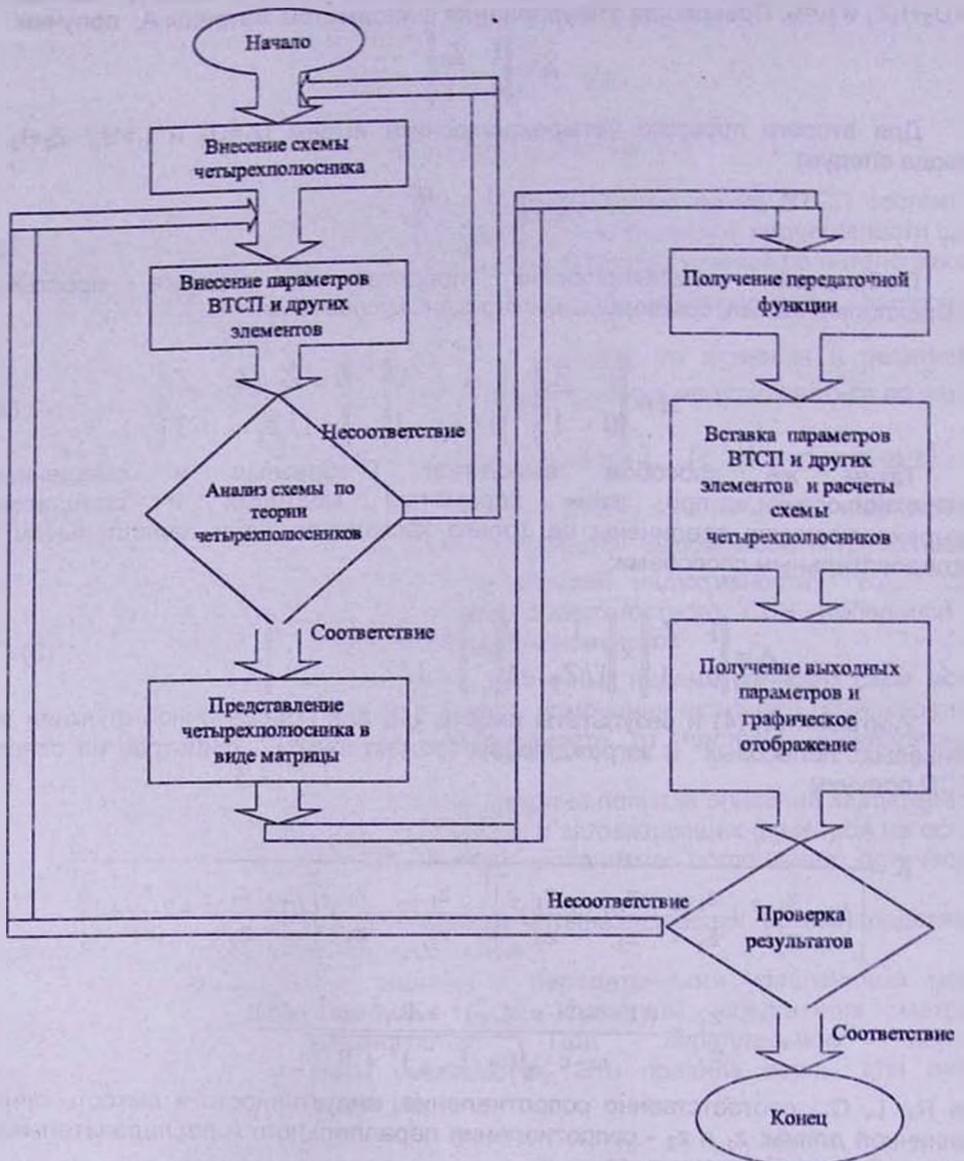


Рис.3. Общее описание алгоритма программного обеспечения Quadripole для автоматизированного графического вывода передаточных функций четырехполюсников

Программа рассчитывает характеристики схемы при помощи четырехполюсниковой матричной теории.

Численные расчеты проведены нами в соответствии с параметрами, экспериментально полученными различными авторами [5-9].

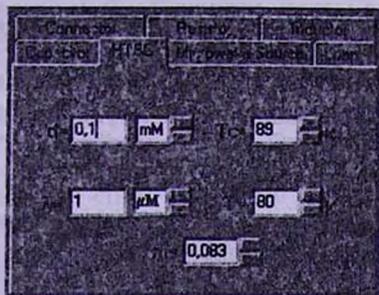


Рис.4. Основные параметры ВТСП, задаваемые из программного обеспечения "Quadripole"

Для $YBa_2Cu_3O_7$ пленок принято:

$$d \approx 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \eta_{\text{эф}} \approx 10\%, \Delta(T, \Delta N) = 0,013 \text{ эВ}, C_t = 10^{-9} \div 10^{-14} \text{ Ф/м},$$

$$\lambda_L \approx 150 \text{ нм}, \tau_{\text{эф}} = 10^{-8} \text{ с}, R_{S0} = 10^{-4} \div 10^{-1} \text{ Ом}, f = 10 \div 1000 \text{ ГГц},$$

$$L_{S0} = 10^{-10} \div 10^{-14} \text{ Гн/см}, T_c = (10 \div 80) \text{ К}.$$

Вышеприведенные параметры заданы в программе (рис.4).

На рис.5, 6 приведены зависимости передаточной функции высокочастотных 8-звеньевых полосовых и 4-звеньевых заграждающих (режекторных) фильтров при различных значениях глубины модуляции активного сопротивления и кинетической индуктивности.

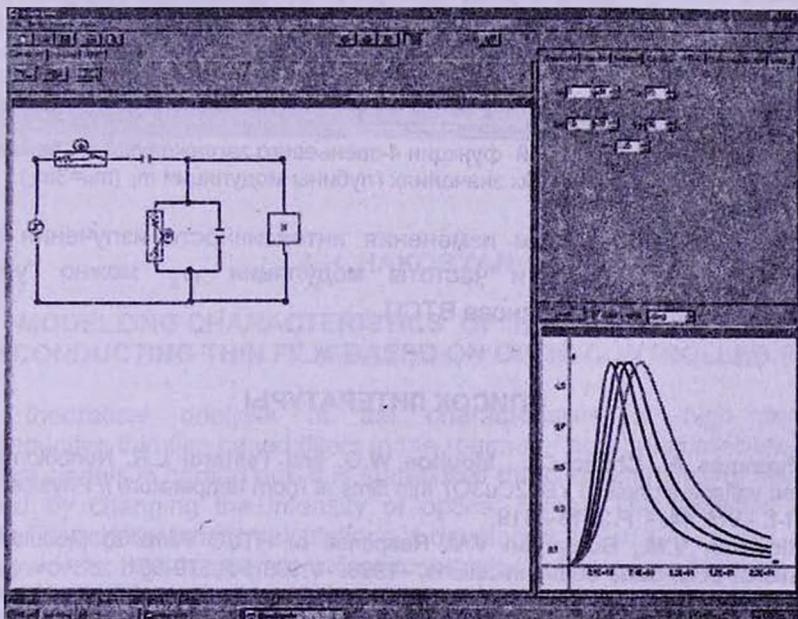


Рис.5. Зависимость передаточной функции 8-звеньевого полосового фильтра при различных значениях глубины модуляции m_L ($m_R=3m_L$)

Как видно из рисунков, с увеличением глубины модуляции кинетической индуктивности m_L полоса пропускания для обоих фильтров (ПФ, ЗФ), оставаясь постоянной, смещается в сторону низких частот, что связано с увеличением L_S из-за поглощения оптического излучения. С увеличением количества звеньев уменьшается полоса пропускания и увеличивается крутизна ветвей для ПФ, а для ЗФ происходит обратный процесс.

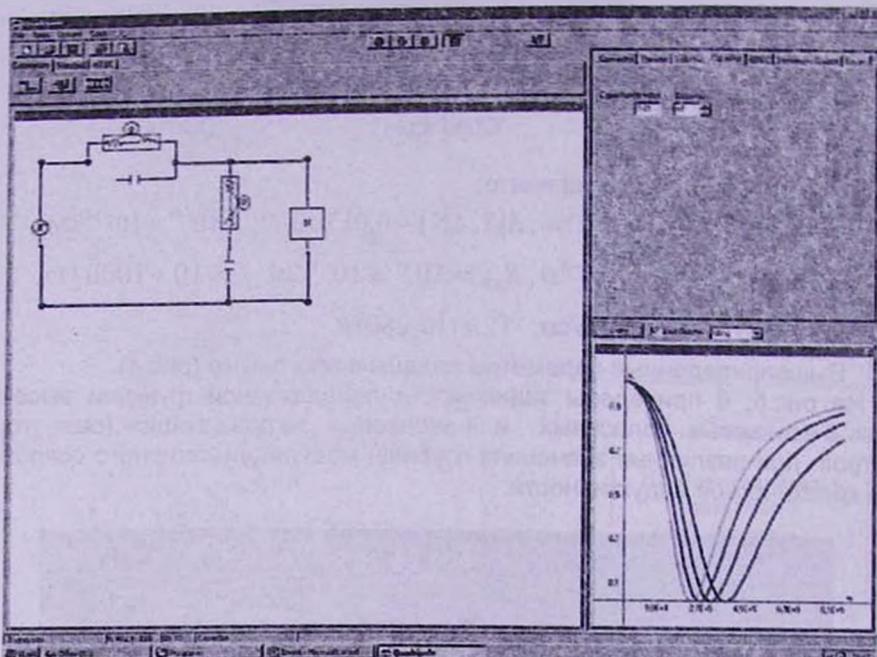


Рис.6. Зависимость передаточной функции 4-звеньевого заграждающего (режекторного) фильтра при различных значениях глубины модуляции m_L ($m_R=3m_L$)

Таким образом, путем изменения интенсивности излучения (глубины модуляции m_R и m_L) и частоты модуляции ω_S можно "управлять" параметрами фильтров на основе ВТСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kleinhammes A., Chang C.L., Moulton W.G. and Testardi L.R. Nonbolometric laser-induced voltage signals in YBa2Cu3O7 thin films at room temperature // Physical Review B. - 1991-I. - Vol. 44. - P.2313-2319.
2. Aroutounian V.M., Buniatyan V.V. Response of HTSC Films to Modulated Optical Radiation // Solid State Communications. -1998. -V.108. - P.579-581.
3. Aroutounian V.M., Buniatyan V.V. Sensitivity of the surface microwave Impedance of HTSC thin films to optical excitation // Journal Thechnical. Physics Letters (Russian, S. Peterburg). - 1999.-V.25. - P.51-56.
4. Бакапов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. - М., 1989.

5. Арутюнян В.М., Буниатян В.В., Буниатян В.В., Акопян А.Г. Характеристики оптически управляемых линий передач и фильтров на основе высокотемпературных сверхпроводников // Изв НАН РА и ГИУА. Сер ТН. – 2003. – Т.56, N2. – С.334-340.
6. Bluser N. Analysis of quantum superconducting kinetic inductance photo detectors // Journal of Applied Physics. – 1995. – V.78. – P.7340-7351.
7. Carlsson E., Gevorgian S., Kollberg E. et al. Optical Response of a YBCO Coplanar Waveguide Resonator // Proceed. IEEE MTT-S Topical Meeting on Optical Microwave Interaction, Goeteborg, Sweden. – 1994. – P.195-197.
8. Finkel A. Mechanism of non equilibrium optical response of high-temperature superconductors // Physical Review. – 1993. – Vol. B48. – P. 9717-9719.
9. Zhang D., Plat D.V. and Fettermann H. Optical control of millimeter wave high-TC superconducting quasi-optical band pass filter // Applied Physics. Letters. – 1991. – V.58. – P.1560-1562.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 3.10.2007.

Ա.Շ.ՏԱՎՈՐՅԱՆ

ԲԱՐՁՐ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԳԵՐԿԱՂՈՐԴԻԳ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՏԻՄԱՆ ՎՐԱ ՕՊՏԻԿԱԿԱՂԵՍ ԴԵՎԱՎԱՐՎՈՂ ՖԻԼՏՐԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Տեսականորեն հետազոտվել են բարձրաջերմաստիճանային գերհաղորդիչ թաղանթային զտիչների բնութագրերը օպտիկական ազդանշանի ոչ ջերմային կլանման ռեժիմում: Հաստատվել է, որ այդ բնութագրերը կարելի է կառավարել օպտիկական ազդանշանի ինտենսիվության փոփոխմամբ: Ձտիչների բնութագրերի ստացումը կատարվել է հեղինակի կողմից նախագծված ծրագրային փաթեթի միջոցով:

Առանցքային բառեր. բարձրաջերմաստիճանային գերհաղորդականություն, զտիչներ, քառաբևեռներ:

A.H. HAKOBYAN

MODELLING CHARACTERISTICS OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING THIN FILM BASED ON OPTIC CONTROLLED FILTERS

The theoretical analysis of the characteristics of high temperature superconductive thin film based filters in the regime of non-bolometric absorption of the optical signals is carried out. It is stated that the characteristics of filters can be controlled by changing the intensity of optical signal. The software based on obtaining filter characteristic calculations is developed.

Keywords: high-temperature superconductivity, filters, quadriangle.