

В. М. АРУТЮНЯН, В. В. БУНИАТЯН, В. В. БУНИАТЯН, А. Г. АКОПЯН

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ И ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Теоретически исследованы характеристики линий передач и фильтров на основе высокотемпературных сверхпроводящих тонких пленок в режиме неболометрического поглощения оптического сигнала. Установлено, что эти параметры можно управлять изменением интенсивности оптического сигнала.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, линии передач, фильтры.

Исследования оптических нелинейных эффектов в тонких высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленках [1,2] показали перспективность реализации ряда СВЧ устройств: оптически управляемых фильтров, фильтров-выключателей, линий задержки, смесителей и детекторов, фильтров-ограничителей, параметрических преобразователей, усилителей и других активных и пассивных цепей, принцип действия которых основан на изменении СВЧ импедансных параметров под влиянием оптического излучения. Особенно привлекает возможность оптического “управления” кинетической индуктивностью. Поскольку кинетическая индуктивность 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 [3,4]. Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований подтверждают [1-4], что доминирующим механизмом поглощения ВТСП материалом оптического излучения является болометрический. Однако при определенных параметрах оптического излучения и состояния образца могут реализовываться и неболометрические механизмы поглощения [6-8]. В рамках двухжидкостной модели, в [5,6] впервые теоретически показано, что при таком механизме поглощения можно “управлять” составляющими СВЧ поверхностного импеданса ВТСП пленок оптическим сигналом.

Согласно [3,4], 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.

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

где

$$\begin{aligned} R_{s0}(t_c) &\approx \frac{R_s(t_c)}{f_{10}^2} f_{20}, \quad R_s(t_c) \approx (\omega \mu_0)^2 \frac{\lambda_L^4(t_c) \sigma_N(t_c)}{d}, \\ L_{s0}(t_c) &\approx \frac{\mu_0 \lambda_L^2}{d f_{10}}, \quad f_{10} \approx 1 - f_1, \quad f_{20} \approx 1 + f_2, \\ \sigma_N(t_c) &\approx \frac{n_N q^2 \tau_N}{m_N}, \quad f_1 \approx \frac{C_1 \Phi_0}{2n_s} \approx \frac{C_1 N_\Phi^0}{2n_s}, \quad f_2 \approx \frac{C_1 \Phi_0}{2n_N} \approx \frac{C_1 N_\Phi^0}{2n_N}, \quad m_1 = m_R + 2m_L, \\ m_R &= \frac{f_2}{1 - f_2}, \quad m_L = \frac{f_1}{1 - f_1} \quad (m_1 \ll 1, m_L \ll 1) \end{aligned}$$

для тонкой пленки толщиной $d \ll \lambda_L$, $t_c = T/T_c < 1$; 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, σ_N - проводимость пленки в нормальном состоянии.

В предлагаемой работе впервые делается попытка описания характеристик линий передач (рис.1) и Γ -образного полосового и заграждающего фильтров (рис.2) на основе ВТСП пленок.

Учитывая (1) и результаты работ [1,2,5,6], для волнового сопротивления Z_B , составляющих коэффициента распространения $K = K' - jK''$ (где $K' = \omega \sqrt{L_{s\Phi} C}$ - коэффициент фазы, $K'' = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{Z_B} + Z_B G \right)$ - коэффициент затухания) линий

передач длиной w получим соответственно

$$\begin{aligned} Z_B &= \sqrt{\frac{(R_1 + j\omega L)(G - j\omega C)}{G^2 + \omega^2 C^2}}, \quad R_1 = R_{s\Phi} \frac{8}{w \pi^2} [1 + 0,25 \ln(\frac{w}{\lambda_\perp} - 1)], \\ \lambda_L(t) &= \lambda_L(0) (1 - t^{\frac{3}{2}})^{-\frac{1}{2}}, \quad \lambda_L^2 = \frac{m_s}{n_s q^2 \mu_0}, \quad \lambda_\perp = \frac{2 \lambda_L^2}{d}, \end{aligned}$$

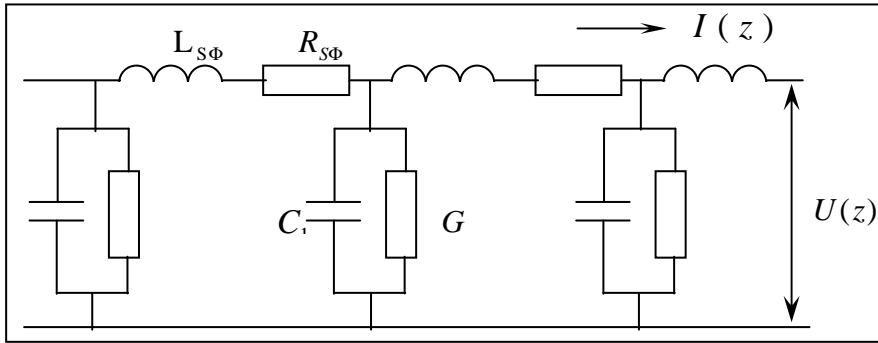
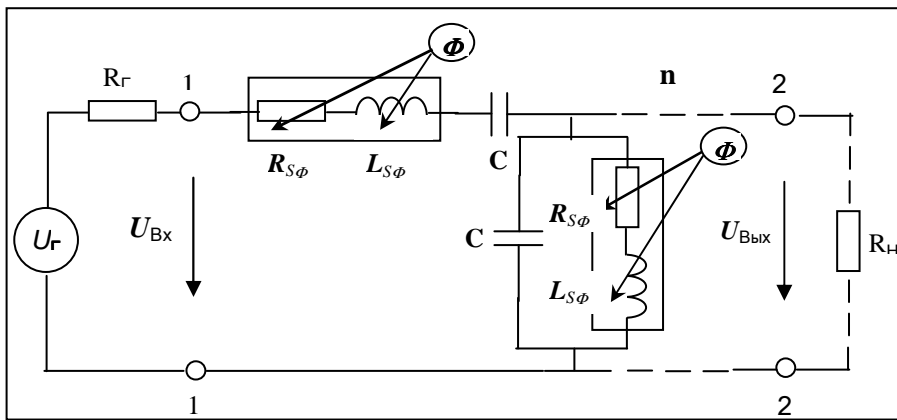
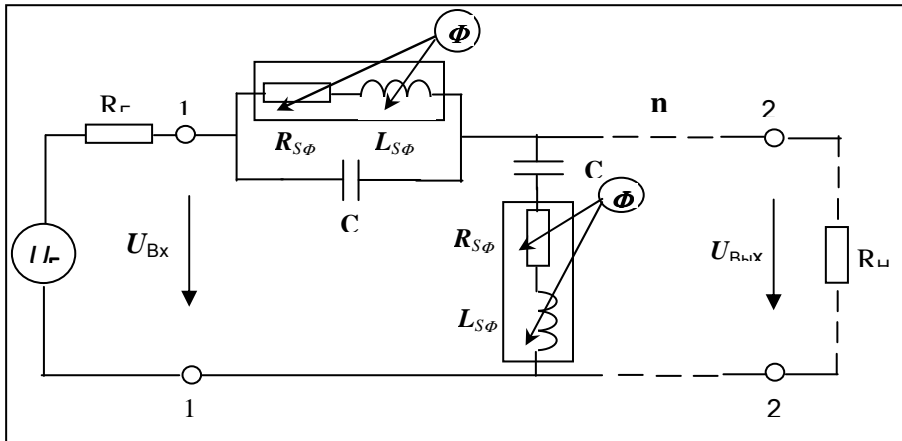


Рис.1. Эквивалентная схема линий передач на основе ВТСП пленок



а)



б)

Рис.2. Эквивалентная схема Г-образного полосового (а) и заграждающего (б) фильтров на основе ВТСП пленок

а для передаточной функции 8-звенных полосовых и заграждающих (режекторных) фильтров:

$$K = \frac{1}{\left[\left(\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 + \frac{Z_1}{Z_2} \left(2 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \right]^2 + \frac{Z_1}{Z_2} \left(2 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \left[\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 + 2 \frac{Z_1}{Z_2} + 1 \right]^2}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{((1 - \omega^2 c L_s)^2 + R_1^2 \omega^2 c^2)}{\omega c \sqrt{(\omega L_s)^2 + R_1^2}}$$

где R_1 , L , C - сопротивление, индуктивность и емкость линий единичной длины соответственно.

Численные расчеты проведены нами в соответствии с параметрами, экспериментально полученными различными авторами [1,2, 5,6]. Для $YBa_2Cu_3O_7$ пленок принято: $d \approx 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\eta_{\text{эф}} \approx 10\%$, $\Delta(T, \Delta N) = 0,013 \text{ эВ}$,
 $C_t = 10^{-9} \dots 10^{-14} \text{ Ф/м}$, $\lambda_L \approx 150 \text{ нм}$,
 $\tau_{\text{эф}} = 10^{-8} \text{ с}$, $R_{s0} = 10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ Ом}$, $f = 10 \dots 1000 \text{ ГГц}$, $L_{s0} = 10^{-10} \dots 10^{-14} \text{ Гн/см}$,
 $T_c = (10 \dots 80) \text{ К}$.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости волнового сопротивления Z_b , составляющей коэффициента распространения K' , K'' и мгновенного значения напряжения в линии (при $U_m=1\text{В}$) от частоты СВЧ сигнала и расстояния x при различных значениях глубины модуляции активного сопротивления и кинетической индуктивности.

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

Видно (рис.3,4), что коэффициенты фазы K' и K'' изменяются пропорционально частоте СВЧ сигнала ω и квадрату частоты соответственно. Поэтому при высоких частотах амплитудное затухание будет более сильно выражено, чем фазовое искажение. Расчеты показывают, что при фиксированной глубине модуляции (m_r и m_L) волновое сопротивление остается постоянным, близким к нулю фазовым значением.

Как видно из рис. 5 и 6, 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 $L_{s\phi}$ из-за поглощения оптического излучения. С увеличением количества звеньев уменьшается полоса пропускания и увеличивается крутизна ветвей для ПФ, а для ЗФ происходит обратный процесс.

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.

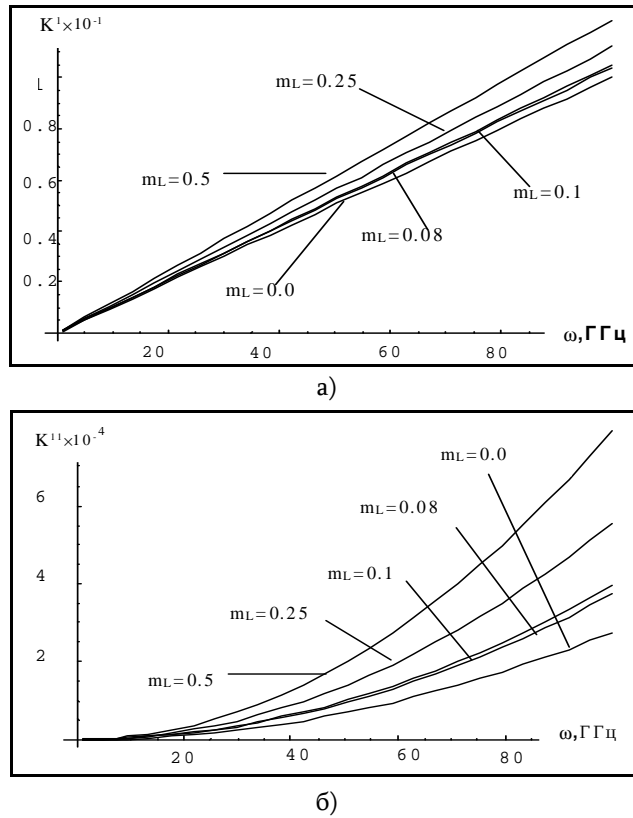


Рис.3. Зависимость $K(a)$, $K(b)$ от частоты СВЧ сигнала при различных значениях глубины модуляции m ($m_R=3m$)

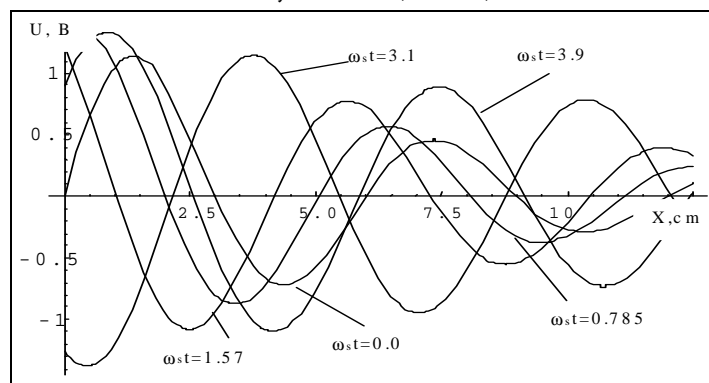


Рис.4. Зависимость мгновенного значения напряжения в линии (при $U_m=1В$) от расстояния x при различных значениях глубины модуляции m ($m_R=3m$) и времени t

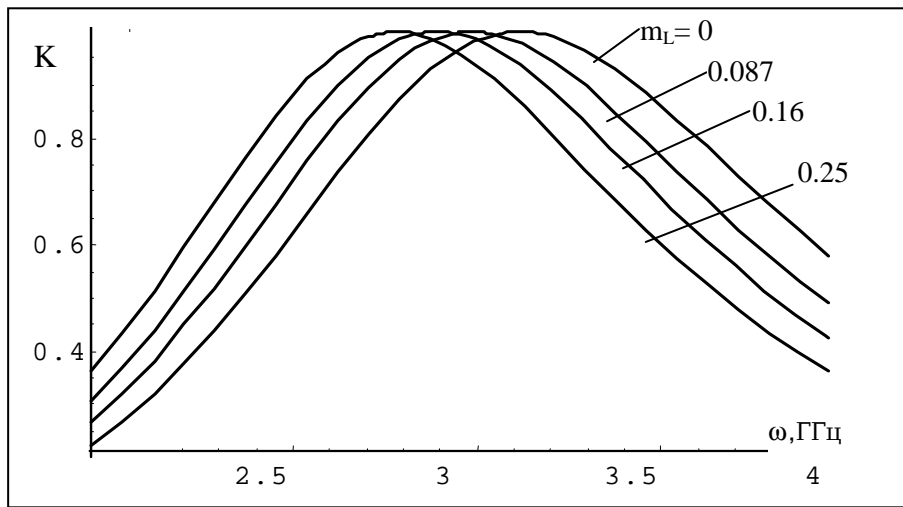


Рис.5. Зависимость передаточной функции 8-звенного полосового фильтра при различных значениях глубины модуляции m_L ($m_R=3m_L$)

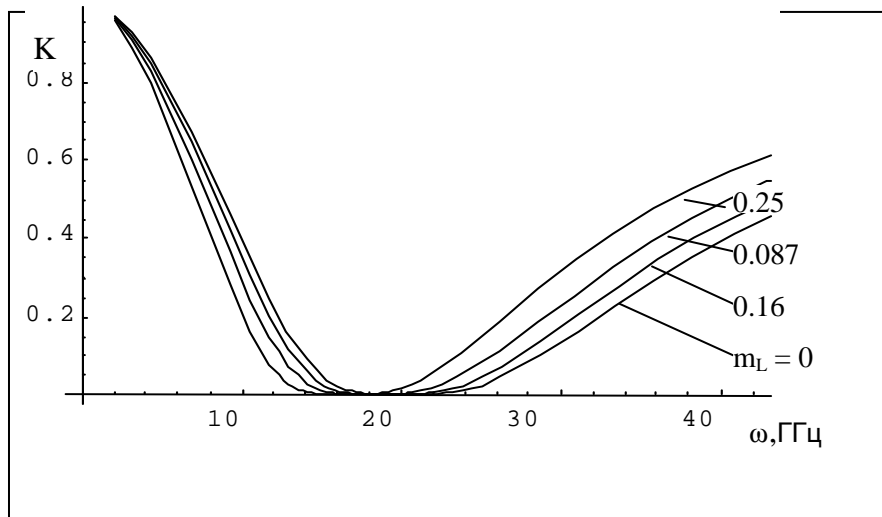


Рис.6. Зависимость передаточной функции 4-звенного заграждающего (режекторного) фильтра при различных значениях глубины модуляции m_L ($m_R=3m_L$)

Работа выполнена в рамках гранта Ansef PS-32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vendik O. G., Gal'chenko S., Kaparkov D. et al.** Models of HTSC Transmission lines as Applied for CAD of Microwave Integrated Circuits// Report N9, ISSN 1103-4599, ISRN CTA-NVT-R—SE. - 1994. – 87p.
2. **Kleinhammes A., Chang C.L., Moulton W. G., and Testardi L. R.** Nonbolometric laser-induced voltage signals in YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin films at room temperature// Physical Review B. -1991-I. -V. 44. -P.2313-2319.
3. **Bluser N.** Analysis of quantum superconducting kinetic inductance photo detectors // Journal of Applied Physics.-1995. -V. 78. -P. 7340-7351.
4. **Fenkel A.** Mechanism of non equilibrium optical response of high-temperature superconductors//Physical Review.-1993.-V.**B48**. -P. 9717-9719.
5. **Aroutiounian V. M., Buniatyan V.V.** Sensitivity of the surface microwave impedance of HTSC thin films to optical excitation // Journal Technical. Physics Letters (Russian, S. Peterburg). – 1999. - V.25. -P. 51-56.
6. **Aroutiounian V. M., Buniatyan V. V.** Response of HTSC Films to Modulated Optical Radiation // Solid State Communications. -1998. -V.108. -P. 579-581.
7. **Carlsson E., Gevorgian S., Kollberg E. et al.** Optical Response of a YBCO Coplanar Waveguide Resonator // Proceed. 1994 IEEE MTT-S Topical Meeting on Optical Microwave Interaction, Goeteborg, Sweden.- 1994. -P.195-197.
8. **Zhang D., Plat D. V., and Fettermarn H.** Optical control of millimeter wave high-TC superconducting quasi-optical band pass filter // Applied Physics. Letters. - 1991 -V. 58. - P.1560-1562.
9. **Trank E. K., Drake R. E., and Hobenwarterg G. K. G.** Optically Modulated Superconducting Delay Lines// IEEE Transaction on Applied Superconductivity. –1993. -V. 3. -P. 2899-2902.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 13. 02. 2003.

**Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ. Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ,
ՎԳ. Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Ա.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ
ՕՊՏԻԿԱԴԵՍ ԿԱՌԱՎԱՐԵԼԻ ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՑԻՆ ԳԵՐՀԱՂՈՂԻՉ
ՀԱՂՈՂՄԱՆ ԳԾԵՐԻ ԵՎ ԶՏԻՉՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ**

Տեսականորեն հետազոտվել են բարձրջերմաստիճանային գերհաղորդիչ թաղանթային հաղորդման գծերի և զտիչների բնութագրերը օպտիկական ազդանշանի ոչ ջերմային կլանման ռեժիմում: Հաստատվել է, որ այդ բնութագրերը կարելի է կառավարել օպտիկական ազդանշանի ինտենսիվության փոփոխմամբ:

**V.M. HAROUTYUNIAN, V.V. BUNIATYAN, Vz. V. BUNIATYAN,
A. H. HAKOBYAN
CHARACTERISTICS OF OPTICALLY CONTROLLED TRANSMISSION
LINES AND FILTERS ON THE BASE OF HTSC**

Characteristics of transmission lines and filters based on high temperature superconductive thin films in the conditions of nonbolometric absorption of the optical signal is investigated. It is established that these parameters can be controlled by changing the intensity of the optical signal.