

УДК 535.241.13:534

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА

О. В. Шакин,

доктор техн. наук, профессор

Р. А. Хансуваров,

ассистент

М. И. Колосков,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Представлена методика расчетов параметров элементов акустооптического модулятора. С ее помощью рассчитаны электрооптическая частотная характеристика акустооптического модулятора, параметры электрической эквивалентной схемы пьезопреобразователя по методу Фано, определены геометрические размеры электрода пьезопреобразователя. Приведены расчеты амплитудно-частотной характеристики согласующей цепи, частотной характеристики изотропного акустооптического взаимодействия и затухания акустической волны в светозвукопроводе. Эти величины используются в расчете электрооптической частотной характеристики акустооптического модулятора. При его разработке параметры указанной характеристики являются одним из основных требований.

Ключевые слова — акустооптический модулятор, электрооптическая частотная характеристика, схема согласования, пьезопреобразователь.

Введение

Особенностью предлагаемой методики расчета схемы согласования акустооптического модулятора (АОМ) является предположение об отсутствии искажений в акустооптической ячейке, работающей на линейном участке модуляционной характеристики АОМ. Данная методика расчета включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя (ПП);
- 2) определение параметров электрической эквивалентной схемы ПП;
- 3) определение размеров верхнего электрода ПП;
- 4) расчет электрической цепи, согласующей ПП с генератором электрического сигнала;
- 5) расчет электрооптических характеристик [1].

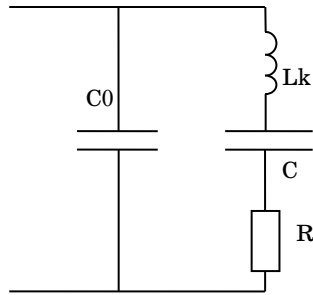
Описание метода расчета

Для расчета схемы согласования для пьезопреобразователя LiNbO_4 и светозвукопровода TeO_2 выбраны следующие исходные данные:

- 1) длительность обрабатываемого сигнала $T = 3$ мкс;
 - 2) среднеарифметическая частота рабочего диапазона $f_0 = 300$ МГц;
 - 3) относительная полоса рабочих частот $\Delta\Omega = 0,333$;
 - 4) уровень неравномерности электрооптической частотной характеристики $\Delta\alpha = 0,1$;
 - 5) длина волны лазерного излучения $\lambda = 632$ нм;
 - 6) мощность генератора сигнала в согласованной нагрузке $P_0 = 100$ мкВт;
 - 7) выходное сопротивление генератора $R_r = 50$ Ом.
- Вид и элементы электрической эквивалентной схемы электроакустического преобразователя на основе пьезоэлектрической пластины представлены на рис. 1.

Определение параметров электрической эквивалентной схемы ПП сводится к определению безразмерного коэффициента электрической связи k и добротности Q последовательного $L_k CR$ -контура:

$$k = \frac{C}{C_0} = 0,2; Q = 4; k = \frac{k_{\text{ЭМ}}^2}{1 - k_{\text{ЭМ}}^2},$$



■ **Рис. 1.** Электрическая эквивалентная схема пьезопреобразователя АОМ

где C — динамическая емкость последовательно-го $L_k CR$ -контура; C_0 — статическая емкость последовательного $L_k CR$ -контура; $k_{эм}$ — коэффициент электромеханической связи.

Если волновые акустические сопротивления ПП и акустического связующего слоя близки по величине, а диссипативные потери в ПП и в акустическом связующем слое малы, то при расчете добротности можно воспользоваться приближенной формулой

$$Q = \frac{\pi W_{PT}}{2W_{BL}},$$

где W_{PT} — волновое акустическое сопротивление ПП; W_{BL} — волновое акустическое сопротивление светозвукопровода.

Частотную характеристику электрооптической эффективности АОМ [2] можно записать в виде

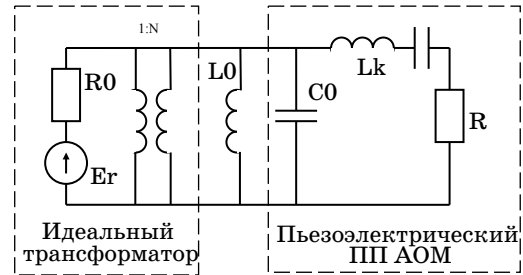
$$K_d = K_a k_1 k_2 k_3 k_4,$$

где K_a — акустооптическая эффективность; k_1 — частотная зависимость энергетической эффективности преобразующей электрической цепи, согласующей ПП с источником управляющего сигнала; k_2 — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия; k_3 — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе; k_4 — частотная зависимость диссипативных потерь в электроакустическом преобразователе и элементах узла его электрического возбуждения.

Частотная зависимость преобразования согласующей цепи

$$k_1 = \frac{P_{II}}{P_0} = 1 - |\Gamma|^2,$$

где P_{II} — электрическая мощность, поглощаемая входом электрической согласующей цепи; P_0 — мощность управляемого сигнала.



■ **Рис. 2.** Полосовая двухзвенная согласующая цепь

Для полосовой двухзвенной согласующей цепи, оптимальной по методу Фано, без учета диссипативных потерь (рис. 2), модуль коэффициента отражения имеет вид

$$|\Gamma|^2 = \frac{\left(Q\sqrt{k} - 1 - (a)^2 Q^2 \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2 + (a)^2 Q^2 \left(1 - \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2}{\left(Q\sqrt{k} + 1 - (a)^2 Q^2 \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2 + (a)^2 Q^2 \left(1 + \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2},$$

$$a = \Omega - \frac{1}{\Omega},$$

где $\Omega = \Delta f / f_0$ — относительная частота. Зависимость $k_1(\Omega)$ показана на рис. 3, линия 1.

Частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия, рассчитывается по формуле

$$k_2(f) = \left(\frac{\sin\left(0,25Q_{KK}\left(P^2\Omega^2 - P\Omega\right)\right)}{0,25Q_{KK}\left(P^2\Omega^2 - P\Omega\right)} \right)^2,$$

где Q_{KK} — параметр Клейна — Кука; $P = f_B / f_0 = 1$ — относительная расстройка среднегеометрической частоты характеристики $k_1(f)$ по отношению к частоте Брэгга;

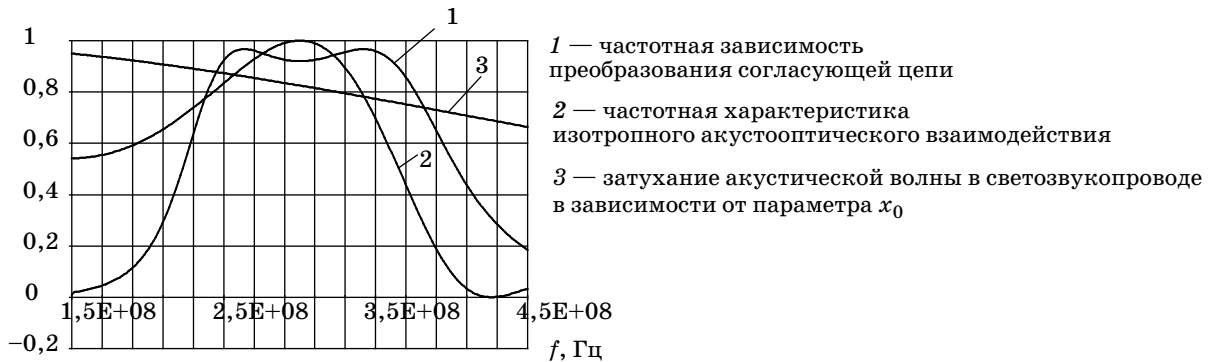
$$f_B = 2n \sin\left(\frac{\theta_B}{\lambda}\right) = 3 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

Здесь $n = 12$ — показатель преломления светозвукопровода; угол Брэгга $\theta_B = 0,02257$.

Зависимость $k_2(f)$ показана на рис. 3, линия 2.

Частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе, рассчитывается по формуле

$$k_3 = \frac{1 - \exp(-x_0\Omega^2)}{x_0\Omega^2}; \quad x_0 = 2\alpha_0 v_{зв} T f_0^2,$$



■ **Рис. 3.** Частотная зависимость преобразования согласующей цепи; акустооптической эффективности; акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе

где α_0 — коэффициент затухания акустической волны; $v_{зв}$ — скорость акустической волны в светозвукопроводе.

Зависимость $k_3(f)$ показана на рис. 3, линия 3.

Потери в электроакустическом тракте малы. Поэтому можно считать, что мощность, поглощаемая согласующей цепью, равна мощности излучаемой ($P_{п} = P_a$). В этом случае $k_4(f) = P_{п}/P_a = 1$.

Электрооптическая частотная характеристика (ЭОЧХ) АОМ записывается в виде

$$K_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f) = A Q_{КК} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{КК}, f, P) k_3(k, Q, f) k_4(f);$$

$$A = \frac{\pi M_2 n_0^2 \lambda_B^2}{4 h \lambda^3 \cos^2(\theta_B)} = 356,701;$$

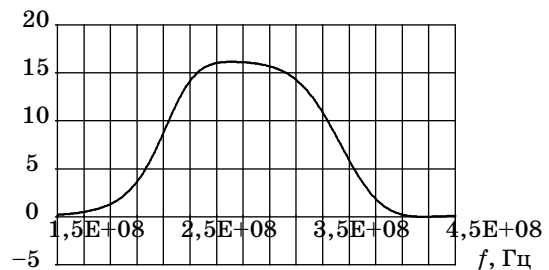
$$Q_{КК} = \frac{2\pi \lambda L}{n_0^2 \lambda_B^2} = 21,0258,$$

где A — параметр взаимодействия; M_2 — акустооптическая добротность среды светозвукопровода; n_0 — показатель преломления светозвукопровода; λ_B — длина акустической волны, при которой углы падающей и дифрагировавшей оптических волн относительно нормали к фронту акустической волны равны; h — поперечный размер внешнего электрода; λ — длина волны лазерного пучка в вакууме; L — продольный размер электрода.

Нормированная ЭОЧХ рассчитывается как

$$K'_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f) = \frac{K_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f)}{A P_0} = Q_{КК} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{КК}, f, P).$$

Параметры k, Q, x_0 определяются физическими параметрами кристалла, а $Q_{КК}$ и P — управляемые параметры, с помощью которых можно получить заданный вид ЭОЧХ.



■ **Рис. 4.** Нормированная ЭОЧХ акустооптического модулятора

Нормированная частотная характеристика показана на рис. 4.

Характеристики на рис. 3 и 4 хорошо согласуются с расчетом, представленным в работе [3].

Длина акустооптического взаимодействия

$$L = \frac{Q_{КК} n v_{зв}^2}{2\pi \lambda f_B^2} = 2,076 \text{ мм.}$$

Электрод был выбран [3] прямоугольной формы. Длина поперечного сечения пьезоэлектрической пластины

$$H = \sqrt{\frac{2v_{зв}^2 \cdot T}{f_H}},$$

где f_H — нижняя граничная частота:

$$f_H = -\Delta f + \sqrt{f_0^2 + \Delta f^2}.$$

Длина поперечного сечения H в работе [3] указана и равна 2,5 мм. Статическая емкость

$$C_0 = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{t} = 46,279 \text{ пФ};$$

$$S = LH; \quad t = \frac{v_{зв}}{2f_0} = 7 \text{ мкм},$$

где $\varepsilon=36,6$ — диэлектрическая проницаемость ПП; $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — площадь электрода; $t=7$ мкм — толщина ПП.

Сопротивление излучения ПП рассчитывается как

$$R = \frac{1}{\omega_0 C_0 k Q} = 14,3312 \text{ Ом.}$$

Величина индуктивности, параллельной ПП:

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0^2} = 6,082 \text{ нГн.}$$

Таким образом, были рассчитаны электрические и геометрические параметры ПП и нормированная ЭОЧХ АОМ, которая является одной из главных характеристик, определяющих его качество.

Заключение

Предлагаемая методика позволяет рассчитать ЭОЧХ АОМ и геометрические размеры электродов пьезоэлемента. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетом, показанным в рабо-

те [3]. Данная методика годится для расчета ЭОЧХ АОМ как в режиме Брэгга, так и в режиме Рамана — Ната.

Особенностью представленной методики является предположение об отсутствии искажений в акустооптической ячейке, работающей на линейном участке модуляционной характеристики АОМ.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.527.12.0019.

Литература

1. Данилов В. В. Инженерный расчет акустооптического модулятора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 2–3. С. 16–21.
2. Гусев О. Б. Методика расчета основных элементов и технических характеристик электроакустооптического тракта акустооптических модуляторов: метод. указ. / ЛИАП. – Л., 1984. – 18 с.
3. Design and fabrication of acousto-optic devices / Ed. Akis P. Goutzoulis, Dennis R. Pape, Sergei V. Kulakov. – N. Y.: University of Rochester, 1994. – 497 p.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несет рекламодатели.