

05;06;08;12

Оптимизация функции пропускания акустооптической ячейки с аподизированным пьезопреобразователем

© В.Н. Парыгин, А.В. Вершубский, Е.Ю. Филатова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 27 октября 2000 г.)

Показано, что использование аподизированного пьезопреобразователя позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков функции пропускания акустооптической ячейки. Предложены схемы последовательного и симметричного включения секций пьезопреобразователя с учетом паразитных параметров, возникающих в электрической цепи. Рассмотрено влияние паразитных параметров на частотные характеристики предложенных схем. Показано, что присутствие паразитных параметров нарушает условие оптимального подавления боковых лепестков функции пропускания, особенно на высоких частотах. Рассчитано, что влияние паразитных параметров может быть скомпенсировано путем включения в цепь дополнительных емкостей на частотах 80 и 150 МГц.

Введение

Акустооптика — это пограничная область между физикой и техникой, в которой изучается взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми и разрабатываются основы применения этих явлений в технике. Взаимодействие света со звуком используется в современной оптике, оптоэлектронике, лазерной технике для управления когерентным световым излучением. Акустооптические устройства позволяют управлять амплитудой, частотой, поляризацией, спектральным составом светового сигнала и направлением распространения светового луча. Важной областью практического применения акустооптических эффектов являются системы обработки информации, где акустооптические устройства используются для обработки СВЧ сигналов в реальном масштабе времени [1].

На основе эффектов акустооптического взаимодействия создаются активные оптические элементы, позволяющие управлять всеми параметрами светового луча, а также обрабатывать информацию, носителем которой являются как световая, так и звуковая волны. Основу таких устройств составляет акустооптическая ячейка, состоящая из рабочего тела, в объеме которого происходит взаимодействие света со звуковой волной, и излучателя звука (обычно пьезоэлектрического преобразователя). В зависимости от назначения имеется несколько типов акустооптических приборов: дефлекторы, модуляторы, фильтры, процессоры и др. [2–4].

В основе явления акустооптического взаимодействия лежит эффект фотоупругости, т. е. изменение показателя преломления среды под действием упругих напряжений. Вследствие этого эффекта распространяющаяся в оптически прозрачной среде акустическая волна представляет собой фазовую дифракционную решетку, перемещающуюся со скоростью звука v . Проходя через акустическое поле, свет дифрагирует на неоднородностях показателя преломления.

При использовании акустооптических ячеек, важную роль играет функция пропускания, т. е. зависимость интенсивности дифрагированного света от его длины волны при заданной частоте звука f . Функция пропускания акустооптической ячейки кроме основного максимума имеет значительные боковые лепестки. Наличие боковых максимумов существенно сужает динамический диапазон акустооптических устройств. В связи с этим в последнее время появился ряд работ [5–10], посвященных вопросу подавления боковых лепестков функции пропускания.

Фильтры, изготовленные на основе акустооптических ячеек, бывают двух типов: коллинеарные и неколлинеарные. В первых управлять функцией пропускания можно с помощью различных звуковых импульсов, подавая их в ячейку вместо непрерывного сигнала. При этом продолжительность управляющего импульса влияет на полосу пропускания фильтра, а форма этого импульса — на вид функции пропускания. Это было экспериментально и теоретически показано в работах [8,10].

К сожалению, при обычной ортогональной геометрии акустооптического взаимодействия данные методы оптимизации функции пропускания неприменимы. Поэтому в данной работе рассматривается возможность уменьшения боковых лепестков путем аподизации пьезопреобразователя и исследуется влияние паразитных параметров, возникающих в схеме такой аподизации.

Вывод основных соотношений для случая аподизированного пьезопреобразователя

Для типичной ортогональной геометрии взаимодействия, когда звуковой столб в ячейке генерируется пьезопреобразователем прямоугольной формы, а световые волны считаются плоскими, система уравнений, описывающая акустооптическое взаимодействие и связывающая амплитуды прошедшего E_t и дифрагированного E_d

света, имеет вид

$$\frac{dE_t}{dx} = -\frac{q}{2} E_d(x) \exp(-j\eta x), \quad \frac{dE_d}{dx} = \frac{q}{2} E_t(x) \exp(j\eta x). \quad (1)$$

Здесь q — коэффициент, пропорциональный амплитуде звуковой волны; $\eta = (\mathbf{k}_t + \mathbf{K} - \mathbf{k}_d) \cdot \mathbf{e}_x$ — параметр расстройки; \mathbf{k}_t , \mathbf{k}_d и \mathbf{K} — волновые векторы падающего и дифрагированного света и звука соответственно; \mathbf{e}_x — единичный вектор вдоль x . Решение системы (1) при граничных условиях

$$E_d(0) = 0, \quad E_t(0) = E_i \quad (2)$$

определяется соотношениями

$$E_d(l) = \exp(j\eta l/2) \frac{qE_i}{\sqrt{q^2 + \eta^2}} \sin \sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2},$$

$$E_t(l) = E_i \exp(-j\eta l/2) \left(\cos \sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2} + \frac{j\eta}{\sqrt{q^2 + \eta^2}} \sin \sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2} \right). \quad (3)$$

Здесь E_i — амплитуда падающего света. Формулы (3) определяют амплитуду световых волн на выходе из ячейки (когда $x = l$). Интенсивность дифрагированного света на выходе из ячейки $I_d = E_d(l)E_d^*(l)$ зависит от параметра Рамана–Ната ql и величины расстройки ηl . Последняя определяется частотой звука $f = Kv/2\pi$ и длиной волны падающего света $\lambda = 2\pi n_t/k_t$. Здесь v — скорость звука, n_t — показатель преломления среды для падающего света. Таким образом, величина $P(\eta l) = I_d(\eta l)/I_d(0)$ описывает функцию пропускания акустооптической ячейки.

Соотношение (1) показывает, что функция $E_d(\eta)$ есть фурье-спектр от произведения qE_t , т.е. от произведения поперечного распределения амплитуды звукового поля и падающей световой волны. Таким образом, для изменения функции пропускания необходимо варьировать распределение амплитуды звукового поля. В случае ортогональной геометрии взаимодействия эта задача чрезвычайно сложна. Однако, нарезав пьезопреобразователь на секции, мы можем менять подаваемое напряжение от секции к секции. В этом случае акустический столб будет состоять из нескольких слоев, каждый из которых будет иметь свою амплитуду звукового поля.

Математическое решение такой задачи по-прежнему можно описать с помощью соотношений (1), полагая, что величина q является константой только в пределах каждой секции. Таким образом, на выходе первой секции решение описывается формулами (3), если заменить q и l на q_1 и l_1 . Затем уравнения (1) могут быть решены для случая $q = q_2$ с начальными условиями $E_t = E_t(l_1)$ и $E_d = E_d(l_1)$. В результате получим амплитуды падающего и дифрагированного света на выходе из второй секции $E_t = E_t(L_2)$ и $E_d = E_d(L_2)$, где $L_2 = l_1 + l_2$. Эти амплитуды являются начальными условиями для

решения уравнений (1) для третьей секции и т.д. Таким образом, эти амплитуды на выходе из $k+1$ -секции могут быть выражены через значения амплитуд предыдущей секции $E_t(L_k)$, $E_d(L_k)$ с помощью рекуррентных соотношений

$$E_t(L_{k+1}) = \exp(-j\eta l_{k+1}/2) \left\{ E_t(L_k) \cos \xi_k + \frac{j\eta E_t(L_k) - q_{k+1} E_d(L_k) e^{-j\eta L_k}}{\sqrt{q_{k+1}^2 + \eta^2}} \sin \xi_k \right\},$$

$$E_d(L_{k+1}) = \exp(j\eta l_{k+1}/2) \left\{ E_d(L_k) \cos \xi_k - \frac{j\eta E_d(L_k) - q_{k+1} E_t(L_k) e^{j\eta L_k}}{\sqrt{q_{k+1}^2 + \eta^2}} \sin \xi_k \right\}. \quad (4)$$

Здесь q_k — параметр, пропорциональный амплитуде звуковой волны в k -й секции; $\xi_k = \sqrt{q_{k+1}^2 + \eta^2} (l_{k+1}/2)$; $L_k = \sum_{i=1}^k l_i$ — суммарная длина k -секций пьезопреобразователя.

Соотношения (4) являются решением системы (1) при $q = q_{k+1}$ и произвольных амплитудах падающего и дифрагированного света на входе $k+1$ -й секции пьезопреобразователя. Например, когда $k = 0$ и $E_d(0) = 0$, то из формулы (4) следует известное решение (3). Соотношения (4) справедливы при любом значении величины q_k . Однако для слабого акустооптического взаимодействия, когда параметр Рамана–Ната $q_k l_k \ll 1$, и, как следствие, членами $(q_k l_k)^2$ можно пренебречь, соотношения (4) можно записать в упрощенном виде

$$E_t(L_{k+1}) = E_t(L_k) - 0.5q_{k+1}l_{k+1} e^{-j\zeta} E_d(L_k) \text{sinc}(\zeta/\pi),$$

$$E_d(L_{k+1}) = E_d(L_k) + 0.5q_{k+1}l_{k+1} e^{j\zeta} E_t(L_k) \text{sinc}(\zeta/\pi). \quad (5)$$

Здесь $\zeta = \eta l_{k+1}/2$, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$. Учитывая начальные условия (2) на входе первой секции и последовательно рассчитывая амплитуды на выходе каждой секции, в результате из (5) можно получить

$$E_t(L_{k+1}) = E_i,$$

$$E_d(L_{k+1}) = 0.5E_i \sum_{m=1}^k q_m l_m e^{j\zeta_m} \text{sinc}(\zeta_m/\pi), \quad (6)$$

где $\zeta_m = \eta l_m/2$.

Таким образом, из представленной теории видно, что, последовательно применяя соотношения (4) для каждого из слоев акустического столба, можно рассчитать распределение амплитуд прошедшего и дифрагированного света на выходе акустооптической ячейки, которое может иметь довольно сложный характер. Путем изменения соотношения длин слоев акустического столба l_k , а также соответствующих амплитуд звукового поля q_k можно добиться существенного подавления боковых лепестков функции пропускания акустооптической ячейки.

Влияние паразитных параметров на функцию пропускания акустооптической ячейки

Типичная функция пропускания акустооптической ячейки с неаподизированным пьезопреобразователем для случая сильного акустооптического взаимодействия представлена кривой *I* на рис. 1. Здесь *P* — относительная интенсивность дифрагированного света в децибелах, $\eta l/\pi$ — параметр расстройки, *l* — длина акустооптического взаимодействия. Эта характеристика широко известна в литературе. Ступенчатого распределения амплитуды звука и, как следствие, изменения вида функции пропускания, показанной на рис. 1, можно достичь, разрезав пьезопреобразователь на несколько электрически изолированных секций разной длины, которые последовательно включаются в электрическую цепь.

На рис. 2 схематично представлено соединение секций пьезопреобразователя с двумя вариантами подключения источника питания: *a* — последовательное, *b* — симметричное подключение генератора. Следует отметить, что при симметричном включении по схеме 2, *b* нет необходимости разрезать среднюю часть пьезопреобразователя на две равные секции, поэтому количество разрезов и соединений в этом случае на один меньше, чем при включении секций по схеме 2, *a*. Каждая секция пьезопреобразователя представляет собой электрическую емкость, величина которой пропорциональна длине этой секции. Амплитуды акустического поля пропорциональны напряжению, приложенному к секциям пьезопреобразователя. Последовательное соединение секций приводит к тому, что акустическая амплитуда на каждой секции обратно пропорциональна емкости, а следовательно, к длине соответствующей секции.

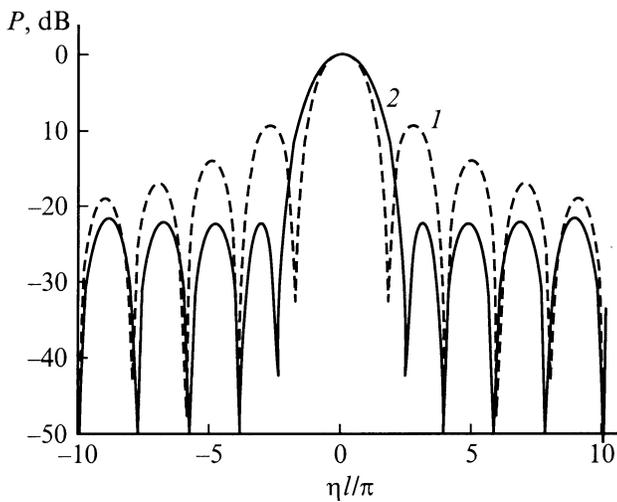


Рис. 1. Функция пропускания акустооптической ячейки при сильном взаимодействии. *I* — ячейка с неаподизированным пьезопреобразователем; *2* — ячейка с пьезопреобразователем, нарезанным на девять секций оптимальной длины.

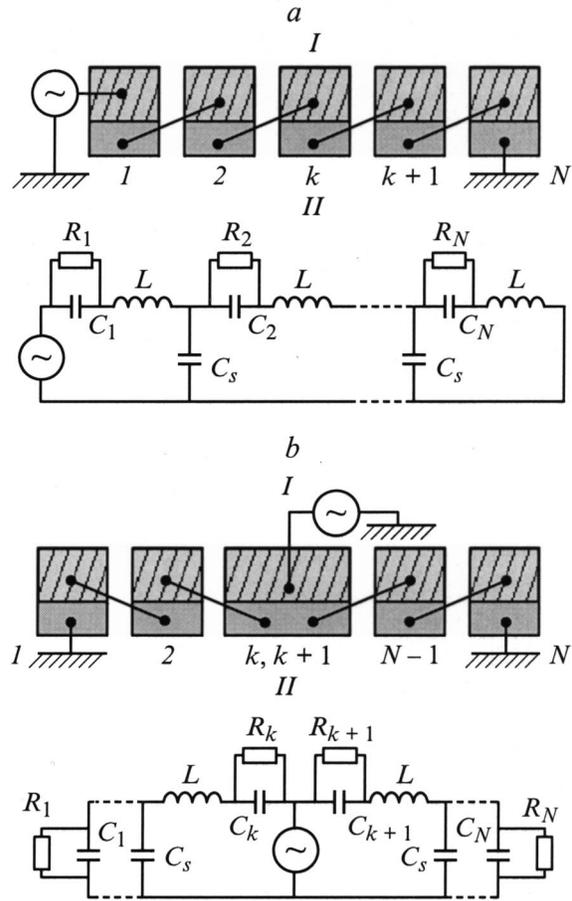


Рис. 2. Схема включения секций пьезопреобразователя: *I* — верхний электрод; *II* — нижний электрод, *a* — источник питания подключен последовательно; *b* — источник питания подключен к центральной секции пьезопреобразователя; C_1, \dots, C_N — емкости секций пьезопреобразователя; R_1, \dots, R_N — сопротивления излучения секций; *L* — паразитные индуктивности соединений; C_s — емкости секций относительно "земли".

Такой пьезопреобразователь будет генерировать акустический столб, состоящий из нескольких слоев с различными амплитудами: чем больше длина секции, тем меньше на ней амплитуда, и наоборот. Расчеты показали, что существуют оптимальные соотношения между длинами секций, при которых уровень боковых лепестков функции пропускания минимален. Нами были рассчитаны условия оптимального подавления боковых лепестков для различного числа секций пьезопреобразователя [11]. Например, кривая 2 на рис. 1 иллюстрирует функцию пропускания для случая сильного акустооптического взаимодействия при нарезании пьезопреобразователя на девять секций ($l_1 = l_9 = 0.187l$, $l_2 = l_8 = 0.112l$, $l_3 = l_7 = 0.086l$, $l_4 = l_6 = 0.0785l$, $l_5 = 0.073l$, где l_k — длина *k*-й секции).

Уровень боковых лепестков при этом понижается с -9.3 dB для акустооптической ячейки с неаподизированным пьезопреобразователем до -21.7 dB для аку-

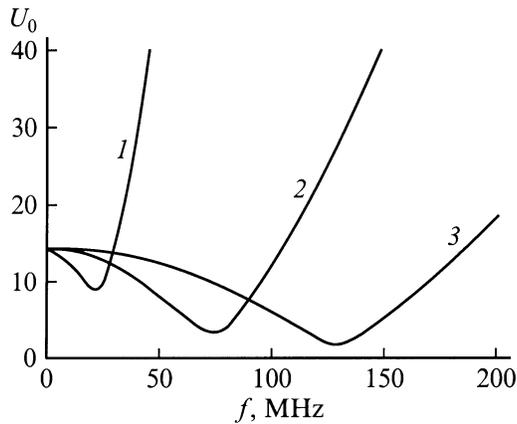


Рис. 3. Зависимость напряжения на пьезопреобразователе U_0 , необходимого для получения 100%-ной эффективности дифракции, от частоты звука f .

стооптической ячейки с аподизированным пьезопреобразователем. Эксперимент, подтверждающий подавление боковых лепестков при оптимально подобранном ступенчатом распределении напряжения, приведен в работе [12]. Чем больше число секций, на которые разрезан пьезопреобразователь, тем меньше уровень боковых лепестков функции пропускания. Однако большое число секций требует высокой точности нарезки, что может вызвать технологические трудности при небольшой полной длине пьезопреобразователя, а многочисленные электрические соединения приводят к появлению в цепи паразитных параметров, которые могут повлиять на работу устройства.

Паразитные параметры, возникающие при осуществлении предложенных схем, могут существенно повлиять на амплитуды и фазы электрического напряжения на секциях. Дело в том, что провода, соединяющие соседние секции, всегда имеют определенную индуктивность, а каждая секция имеет паразитную емкость относительно "земли". На низких звуковых частотах влиянием этих реактивных параметров можно пренебречь, однако на высоких частотах они могут значительно изменить амплитудное и фазовое распределение звукового поля. Как следствие, нарушится условие оптимального подавления боковых лепестков. С учетом паразитных параметров принципиальные схемы соединения секций пьезопреобразователя с последовательным и симметричным подключением генератора можно представить в виде, представленном на рис. 2, *a* и *b* соответственно. Здесь C_1, \dots, C_N — емкости секций пьезопреобразователя; R_1, \dots, R_N — сопротивления излучения каждой секции, описывающие преобразование электрической энергии в акустическую; L — индуктивности проводов, соединяющих последовательные секции; C_s — емкости секций относительно "земли".

Расчеты показали, что в этих случаях в электрической цепи имеется резонанс амплитуды на секциях

пьезопреобразователя на частоте, определяемой условием $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, где $C = C_0/N$, N — число секций, $C_0 = \sum_{k=1}^N C_k$ — полная емкость целого пьезопреобразователя. Рис. 3 иллюстрирует зависимость напряжения на пьезопреобразователе U_0 , необходимого для достижения 100%-ной эффективности дифракции, от частоты ультразвука f при значении $N = 7$, $L = 15$ нН, $C_s = 10$ пФ; $C_0 = 20300$ (1), 2100 (2), 700 пФ (3). Эти величины являются типичными для современных акустооптических пьезопреобразователей. Резонансные частоты в этих случаях равны $f_0 = 24, 75, 130$ МГц. Видно, что на частоте, близкой к резонансной для данного C_0 , напряжение генератора, необходимое для 100%-ной перекачки падающего света в дифрагированный, минимально.

Однако чем больше C_0 , тем уже диапазон частот, в котором может работать такое устройство, поскольку на частотах выше резонансных для получения высокой эффективности дифракции требуется довольно большое напряжение питания. Распределение амплитуды напряжения на секциях пьезопреобразователя также зависит от частоты звука. На рис. 4, *a* представлено это распределение для случая включения секций по схеме 2, *a*, а на рис. 4, *b* — по схеме 2, *b* при $N = 8$, $C_0 = 700$ пФ, $L = 15$ нН, $C_s = 10$ пФ. Здесь U_k — амплитуды напря-

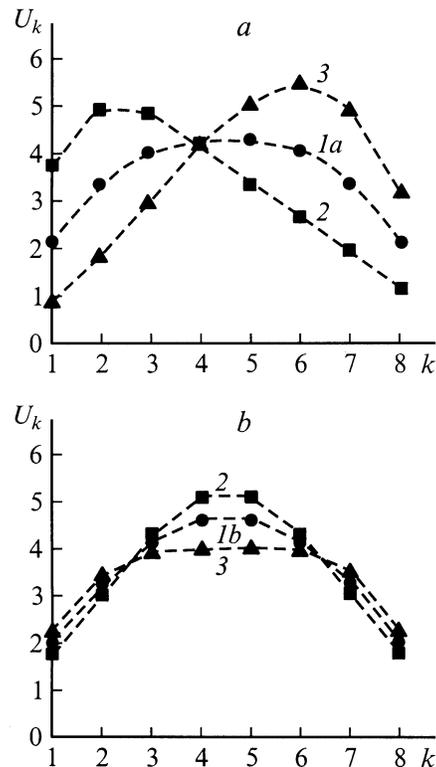


Рис. 4. Распределение амплитуды напряжения на секциях пьезопреобразователя U_k для $N = 8$, $C_0 = 700$ пФ, $L = 15$ нН, $C_s = 10$ пФ. *a* — последовательное включение по схеме рис. 2, *a*, *b* — симметричное включение по схеме рис. 2, *b*; $f_0 = 142.5$ (1*a*), 133 МГц (1*b*); $f = 100$ (2), 160 МГц (3).

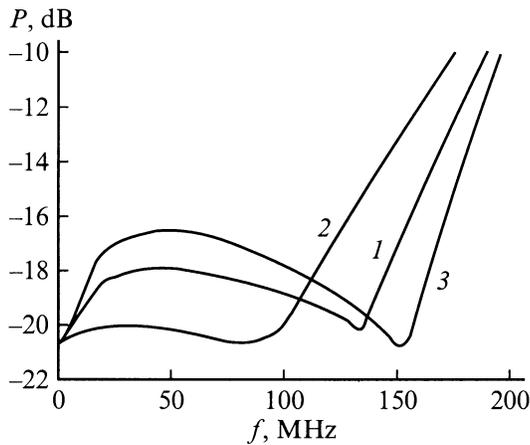


Рис. 5. Зависимость максимального уровня боковых лепестков функции пропускания от частоты звука f для симметричного включения секций пьезопреобразователя. $N = 7$, $C_0 = 700$ пФ, $L = 15$ нГн, $C_s = 10$ пФ; 1 — без компенсации, 2 и 3 — влияние паразитных параметров скомпенсировано на частотах 80 и 150 МГц соответственно.

жений на k -й секции, причем рассчитаны эти амплитуды для 100%-ной эффективности дифракции.

Следует отметить, что кривые на данном рисунке условны, поскольку на самом деле распределения ступенчатые и напряжения, указанные в узловых точках, являются постоянными в пределах соответствующей секции, а эти точки соединены кривой лишь для удобства изображения. Кривые 1 соответствуют условиям, которые являются оптимальными для подавления боковых лепестков функции пропускания. Они рассчитаны для резонансных частот. На частотах, отличных от резонансных, имеет место искажение оптимального распределения амплитуды напряжений на секциях пьезопреобразователя. В случае включения по схеме 2, *a* это распределение становится асимметричным, причем на частотах ниже резонансной максимальная амплитуда смещается влево (кривая 2), а на частотах выше резонансной вправо (кривая 3). При включении секций по схеме 2, *b* сохраняется симметрия распределения амплитуды напряжения на секциях, однако соотношение амплитуд напряжений нарушается.

Существенное изменение распределения амплитуды напряжения влечет за собой увеличение уровня боковых лепестков функции пропускания, особенно на высоких частотах. Наши расчеты показали, что это нежелательное влияние паразитных параметров может быть уменьшено путем введения в цепь дополнительных компенсирующих емкостей. В принципиальных схемах на рис. 2 в этом случае к емкостям C_k параллельно присоединяются емкости ΔC_k . Подбором величин этих дополнительных емкостей ΔC_k на определенной частоте можно добиться, чтобы распределение амплитуды напряжения на секциях стало оптимальным.

Следует отметить, что добавление компенсирующих емкостей всегда смещает характеристики, приведенные на рис. 3, в сторону более низких частот. Расчеты показали, что наилучшая компенсация достигается для симметричного включения секций пьезопреобразователя по схеме 2, *b*. На рис. 5 представлен максимальный уровень боковых лепестков функции пропускания для такого включения в зависимости от частоты для $N = 7$, $C_0 = 700$ пФ, $L = 15$ нГн, $C_s = 10$ пФ. Кривая 1 соответствует случаю без дополнительных емкостей ΔC_k , кривые 2 и 3 соответствуют компенсации влияния паразитных элементов на частотах 80 МГц (при этом дополнительные емкости оказались равными $C_1 = C_7 = 2$ пФ, $C_2 = C_6 = 4$ пФ, $C_3 = C_5 = 10$ пФ, $C_4 = 30$ пФ) и 150 МГц (соответственно $C_1 = C_7 = 60$ пФ, $C_2 = C_6 = 25$ пФ, $C_3 = C_5 = 6$ пФ, $C_4 = 0$).

На основании представленных данных можно сделать вывод, что в окрестности частоты, для которой рассчитывались компенсирующие емкости, уровень боковых лепестков ниже, чем в случае $\Delta C_k = 0$. При этом существует конечный частотный диапазон, в пределах которого уровень боковых лепестков достаточно мал, например менее 20 дБ. В частности, при компенсации на частоте 80 МГц он составляет около 100 МГц, а на частоте 150 МГц — лишь около 20 МГц. Также необходимо отметить, что для больших величин C_0 при компенсации на частотах выше резонансной требуется большое напряжение питания в соответствии с рис. 3. Тем не менее следует ожидать, что при известных величинах паразитных параметров, например для $C_0 = 700$ пФ, можно согласовать схему на некоторой рабочей частоте, в окрестностях которой уровень боковых лепестков будет достаточно низок, например ниже 20 дБ.

Заключение

Как показали проведенные исследования, паразитные параметры, возникающие при осуществлении предложенных схем аподизации пьезопреобразователя, могут существенно повлиять на амплитуды и фазы электрического напряжения на его секциях и, как следствие, значительно изменить амплитудное и фазовое распределения звукового поля, особенно на высоких частотах. Это может привести к нарушению условия оптимального подавления боковых лепестков, что крайне нежелательно, поскольку использование аподизированного пьезопреобразователя позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков функции пропускания акустооптической ячейки. Однако, как показали проведенные расчеты, влияние паразитных параметров может быть скомпенсировано путем включения в цепь дополнительных емкостей, величины которых были рассчитаны на частотах как ниже, так и выше резонансных. Оказалось, что наилучшая компенсация влияния паразитных параметров достигается в схеме с симметричным подключением источника питания. При этом в пределах

определенного частотного диапазона уровень боковых лепестков составляет менее 20 dB при числе секций пьезопреобразователя, равном 7.

Список литературы

- [1] *Парыгин В.Н., Балакиев В.И.* Оптическая обработка информации. М.: Изд-во Московского ун-та, 1987. 157 с.
- [2] *Корпел А.* Акустооптика. М.: Мир, 1993. 240 с.
- [3] *Магдич Л.Н.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. № 8. С. 1683–1690.
- [4] *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 232 с.
- [5] *Мазур М.М., Шорин В.Н.* и др. // Опт. и спектр. 1996. Т. 81. № 3. С. 521–523.
- [6] *Зайцев А.К., Клуздин В.В.* // Изв. вузов. Электроника. 1998. Т. 41. № 10. С. 75–80.
- [7] *Pustovoi V., Gupta N.* // EOS Topical Meetings Digest Series. 1999. Vol. 24. P. 35–36.
- [8] *Парыгин В.Н., Вершубский А.В.* // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 5. С. 615–620.
- [9] *Парыгин В.Н., Вершубский А.В.* // РиЭ. 1998. Т. 43. № 11. С. 1369–1374.
- [10] *Парыгин В.Н., Вершубский А.В., Холостов К.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 12. С. 76–81.
- [11] *Parygin V.N., Vershoubskiy A.V., Filatova E.Yu.* // J. Modern Optics. 2000. Vol. 47. N 9. P. 1501–1511.
- [12] *Parygin V.N., Molchanov V.Ya., Filatova E.Yu.* // EOS Topical Meetings Digest Series. 1999. Vol. 24. P. 45–46.