

УДК 534.2:535.41

## ЭЛЕКТРОННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО СИНХРОНИЗАТОРА МОД ЛАЗЕРА

© 2017 г. Л. Н. Магдич<sup>а</sup>, В. И. Балакший<sup>б, \*</sup>, С. Н. Манцевич<sup>б</sup><sup>а</sup>НИИ “Полус” им. М.Ф. Стельмаха, 117342 Москва, ул. Введенского 3, корп. 1<sup>б</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы

\*e-mail: balakshy@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 21.10.2016 г.

Теоретически и экспериментально исследован эффект электронной перестройки акустических резонансов в акустооптическом синхронизаторе мод лазера. В приближении плоских акустических волн решена задача возбуждения акустического резонатора Фабри–Перо пластинчатым пьезопреобразователем с учетом реальных параметров ВЧ-генератора и элементов согласования преобразователя с генератором. Перестройка резонансов осуществлялась путем изменения согласующей индуктивности, включенной в параллель к преобразователю акустооптической ячейки. В эксперименте использовалась ячейка, изготовленная из плавленого кварца с преобразователем из ниобата лития. Изменение согласующей индуктивности в диапазоне от 0.025 до 0.2 мкГн обеспечило перестройку частоты акустического резонанса на 0.19 МГц, что превышает полуширину акустического резонанса.

**Ключевые слова:** акустооптическое взаимодействие, синхронизация мод лазера, акустооптический модулятор, акустический резонатор Фабри–Перо, пьезопреобразователь.

DOI: 10.7868/S0320791917060090

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акустооптические (АО) методы управления оптическим излучением широко применяются в различных областях науки и техники [1–5]. Такие АО-устройства, как модуляторы, дефлекторы и фильтры, отличаются высоким быстродействием, низким управляющим напряжением, надежностью и простотой конструкции. Эти достоинства определили их широкое применение не только в лазерной физике и контрольно-измерительной технике, но также и в экологии, медицине, военном деле.

Одним из важных применений АО-эффекта является синхронизация продольных мод лазеров путем модуляции внутренних потерь лазера на частоте межмодового интервала. Для этого используется, как правило, АО-модулятор, располагаемый внутри резонатора лазера [6–12]. При возбуждении в ячейке модулятора стоячей акустической волны с частотой  $f$  интенсивность светового пучка, проходящего через ячейку, меняется с частотой  $2f$ . Наиболее сильный эффект синхронизации мод возникает, когда частота  $2f$  становится равной частоте межмодового интервала лазера  $\Delta\nu = c/2L$ , где  $c$  – скорость света, а  $L$  – длина резонатора лазера. В этом случае лазер начинает генерировать излучение в виде последо-

вательности импульсов с частотой повторения  $c/2L$  и длительностью  $\tau \approx 2L/cN$ , где  $N$  – число засинхронизованных мод.

Важным условием для получения режима синхронизации мод лазера является хорошая температурная стабилизация лазера, и особенно ячейки синхронизатора мод. Если в процессе работы лазера температура изменится хотя бы на несколько градусов (что соответствует реальной ситуации), то это приведет к изменению длины ячейки модулятора и скорости ультразвука. В результате нарушится условие  $\Delta\nu = 2f$  и синхронизация мод исчезнет. Разумеется, подстройкой частоты ВЧ-генератора, запитывающего модулятор, можно опять настроить АО-ячейку в резонанс, но это не спасет ситуацию.

Недавно при экспериментальном исследовании АО-синхронизаторов мод нами было обнаружено, что можно перестраивать акустические резонансные частоты АО-модулятора с помощью реактивных электрических элементов, включаемых между модулятором и ВЧ-генератором для электрического согласования их импедансов. Обнаруженный эффект открывает возможности для создания оптоэлектронной цепи обратной связи, обеспечивающей стабилизацию акустических резонансов. В данной работе дается теоретический

анализ эффекта, а также приводятся первые экспериментальные результаты.

**ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СИНХРОНИЗАТОРЕ МОД**

Задачу возбуждения акустических волн в АО-ячейке синхронизатора мод рассмотрим в приближении плоских волн. Предположим, что пьезоэлектрическая пластина акустического преобразователя имеет толщину  $h$ , а АО-модулятор представляет собой резонатор Фабри–Перо длиной  $l$  в направлении распространения ультразвука  $x$  (рис. 1). Индексами “1” и “2” будем обозначать параметры, относящиеся к пьезоэлектрику и АО-материалу соответственно. Тогда для акустического смещения  $u_2$  можно записать волновое уравнение:

$$\rho_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = c_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

а для смещения  $u_1$  – уравнения [13–17]:

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= e \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + c_1^E \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \\ &= \left( \frac{e^2}{\epsilon^S} + c_1^E \right) \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} \equiv \bar{c}_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$D = -\epsilon^S \frac{\partial \varphi}{\partial x} + e \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad (3)$$

$$T_1 = e \frac{\partial \varphi}{\partial x} + c_1^E \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad (4)$$

где  $\rho_{1,2}$  – плотности,  $T_{1,2}$  – акустические напряжения,  $c_{1,2}$  – модули упругости,  $e$  – соответствующий пьезоэлектрический модуль,  $\epsilon^S$  – диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации,  $D$  – электрическая индукция,  $\varphi$  – электрический потенциал. Через  $\bar{c}_1$  обозначен модуль упругости, “ужесточенный” за счет пьезоэффекта [13]. Поскольку в синхронизаторе мод толщина пьезопластинки  $h$  обычно много меньше длины АО-ячейки  $l$ , то решение в пьезоэлектрике ищем в виде бегущих гармонических волн:

$$u_1 = P \exp[j(\Omega t - K_1 x)] + Q \exp[j(\Omega t + K_1 x)], \quad (5)$$

а в АО-ячейке – в виде затухающих волн:

$$u_2 = R \exp(-\alpha x) \exp[j(\Omega t - K_2 x)] + S \exp(\alpha x) \exp[j(\Omega t + K_2 x)], \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $K_{1,2} = \Omega/V_{1,2}$  – волновые числа,  $V_{1,2}$  – скорости ультразвука,  $P, Q, R$  и  $S$  – амплитуды бегущих волн. Граничные условия для нашей задачи имеют вид

$$T_1(-h) = 0, \quad T_2(l) = 0, \quad (7)$$

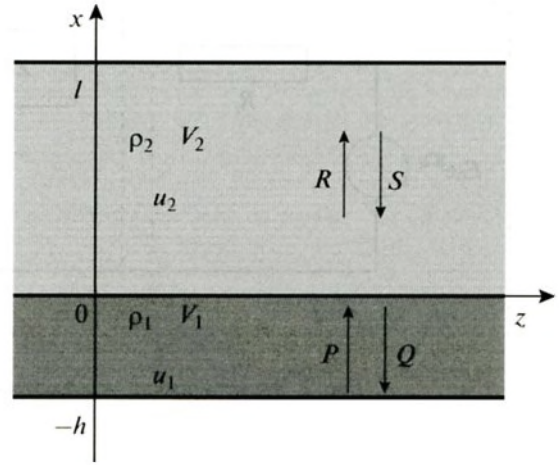


Рис. 1. Возбуждение ультразвука в АО-ячейке синхронизатора мод (постановка задачи).

$$u_1(0) = u_2(0), \quad T_1(0) = T_2(0). \quad (8)$$

Дополнительно полагаем, что электрод при  $x = 0$  заземлен, а на электрод при  $x = -h$  подается напряжение с амплитудой  $U_0$  и частотой  $\Omega$ :

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi(-h) = U_0 \exp(j\Omega t). \quad (9)$$

Подстановка (5) и (6) в уравнения (1)–(4) и учет граничных условий (7)–(9) приводят к системе уравнений для определения амплитуд:

$$\begin{cases} P + Q = R + S \\ R \exp[-(\alpha + jK_2)l] = S \exp[(\alpha + jK_2)l] \\ j\bar{c}_1 K_1 (-P + Q) - c_2 (\alpha + jK_2) (-R + S) = \frac{e}{\epsilon^S} D_0 \\ j\bar{c}_1 K_1 [-P \exp(jK_1 h) + Q \exp(-jK_1 h)] = \frac{e}{\epsilon^S} D_0 \\ U_0 + \frac{e}{\epsilon^S} \{ P [1 - \exp(jK_1 h)] + \\ Q [1 - \exp(-jK_1 h)] \} = \frac{h}{\epsilon^S} D_0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $D_0$  – амплитуда электрической индукции.

Введем безразмерную частоту  $F = K_1 h = \Omega h/V_1$ , относительный акустический импеданс  $Z_a = \sqrt{\rho_2 c_2 / \rho_1 \bar{c}_1} = K_2 c_2 / K_1 \bar{c}_1$  и коэффициент электромеханической связи  $k = e / \sqrt{\epsilon^S \bar{c}_1}$ . Тогда из (10) для амплитуд  $P, Q, R$  и  $S$  получим соотношения

$$P = \frac{1}{2 \cos F} \times \left\{ R (E^2 + 1) [2 \cos F - \exp(jF)] + j \frac{k^2 h}{eF} D_0 \right\}, \quad (11)$$

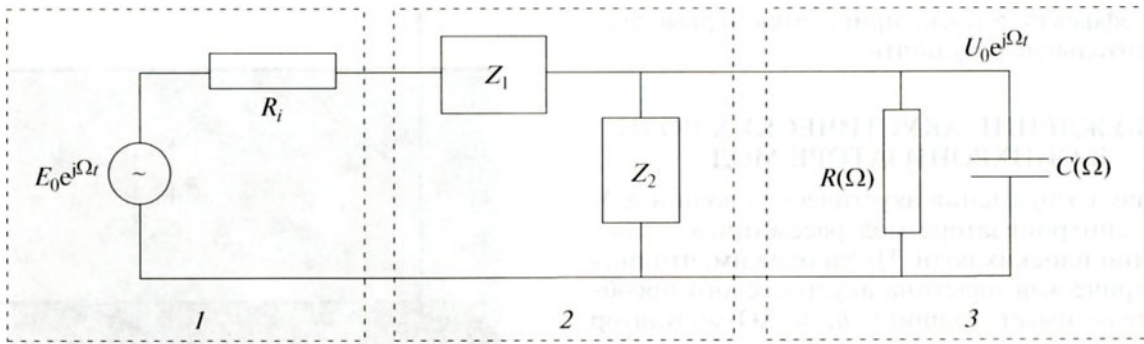


Рис. 2. Электрическая схема согласования пьезопреобразователя с генератором.

$$Q = \frac{1}{2 \cos F} \left[ R(E^2 + 1) \exp(jF) - j \frac{k^2 h}{eF} D_0 \right], \quad (12)$$

$$S = RE^2, \quad (13)$$

$$R = \frac{e}{c_1} (1 - \cos F) U_0 \left\{ \frac{Z_a}{F} (\beta + jF) (E^2 - 1) \times \right. \\ \left. \times (F \cos F - k^2 \sin F) + (E^2 + 1) \times \right. \\ \left. \times [F \sin F - 2k^2 (1 - \cos F)] \right\}^{-1}, \quad (14)$$

где  $E = \exp[-\gamma(\beta + jF)]$ ,  $\gamma = V_1 l / V_2 h$ ,  $\beta = \alpha V_2 h / V_1$ .

Акустическое поле в АО-ячейке запишется в виде

$$u_2 = R \{ \exp[-\gamma(\beta + jF)X] + \exp[\gamma(\beta + jF)(X - 2)] \} \exp(j\Omega t). \quad (15)$$

Здесь введена безразмерная координата  $X = x/l$ . Из (15) следует, что на краях ячейки акустические колебания имеют вид

$$u_2(X = 0) = R(1 + E^2) \exp(j\Omega t) \quad \text{и} \\ u_2(X = 1) = 2RE \exp(j\Omega t). \quad (16)$$

Плотность тока смещения через пьезопреобразователь определяется выражением  $J = \partial D / \partial t$ . Отсюда получаем электрическую проводимость преобразователя  $Y_e$  в форме [15, 16]

$$Y_e = \frac{j\Omega C_0 D_0 h}{\varepsilon^S U_0} = \frac{j\Omega C_0 F}{F - k^2 \operatorname{tg} F} \times \\ \times \left\{ 1 - \frac{k^2 (E^2 + 1) (1 - \cos F)^2}{\cos F \frac{Z_a}{F} (\beta + jF) (E^2 - 1) (F \cos F - k^2 \sin F) + (E^2 + 1) [F \sin F - 2k^2 (1 - \cos F)]} \right\}, \quad (17)$$

где через  $C_0 = \varepsilon^S ab / h$  обозначена статическая емкость преобразователя ( $ab$  — площадь преобразователя).

### СОГЛАСОВАНИЕ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ГЕНЕРАТОРОМ

Актуальной проблемой при создании АО-устройств является согласование пьезопреобразователя с ВЧ-генератором [13]. Для этого используются реактивные элементы (конденсаторы и катушки индуктивности), включаемые между преобразователем и генератором, как показано на рис. 2. Здесь блоками 1 и 3 представлены гене-

ратор с ЭДС  $E_0 \exp(j\Omega t)$  и внутренним сопротивлением  $R_i$  и преобразователь в виде параллельно включенных эквивалентных параметров

$$R = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_e)} \quad \text{и} \quad C = \frac{\operatorname{Im}(Y_e)}{\Omega}. \quad (18)$$

Сопротивление  $R$  описывает преобразование подводимой к пьезопластине электрической мощности в акустическую и носит название “сопротивления излучения”. Обычное омическое сопротивление мало, и им можно пренебречь. Блок 2 содержит два согласующих элемента  $Z_1$  и  $Z_2$ , включенных последовательно и параллельно

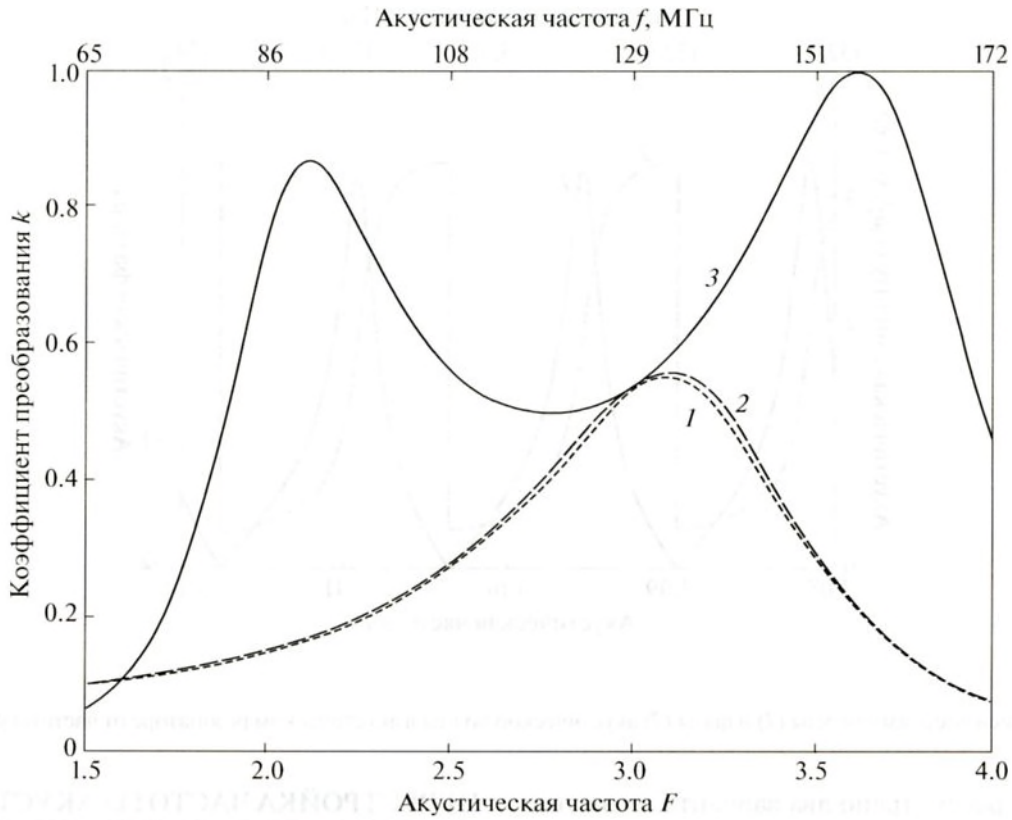


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от частоты при различных включениях согласующей индуктивности. 1 – индуктивность отсутствует, 2 – последовательное включение, 3 – параллельное включение.

преобразователю. Из рис. 2 следует, что амплитуда напряжения на преобразователе  $U_0$  определяется соотношением

$$U_0 = \frac{E_0}{1 + (R_i + Z_1)(Y_e + Z_2^{-1})}. \quad (19)$$

Из формул (19) и (17) видно, что напряжение на преобразователе находится в сложной зависимости как от частоты генератора  $\Omega$ , так и от величин согласующих элементов. Разумеется, согласующие элементы не меняют импеданса преобразователя. Но поскольку изменяется напряжение на преобразователе, то, как следствие, должна меняться частотная характеристика возбуждения ультразвука.

Коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую  $k$  определим как отношение акустической мощности  $P_a$  к мощности, отдаваемой генератором в согласованную нагрузку  $P_m$ :

$$k = \frac{P_a}{P_m} = \frac{4R_i |U_0|^2}{RE_0^2}. \quad (20)$$

Для схемы на рис. 2

$$k = \frac{4R_i \operatorname{Re}(Y_e)}{|1 + (R_i + Z_1)(Y_e + Z_2^{-1})|^2}. \quad (21)$$

Полученные выражения позволяют рассчитать электрические и акустические характеристики АО-синхронизатора мод [18]. Ниже представлены результаты расчета для устройства, использованного в наших экспериментах. В этом устройстве АО-ячейка была выполнена из плавного кварца в виде прямоугольного параллелепипеда размером  $5 \times 8 \times 24$  мм ( $l = 5$  мм в направлении распространения ультразвука) с параметрами  $V_2 = 5.96 \times 10^5$  см/с,  $\rho_2 = 2.2$  г/см<sup>3</sup>. Пластина преобразователя была изготовлена из кристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ )  $Y + 36^\circ$ -го среза; она имела площадь  $a \times b = 9.6$  мм<sup>2</sup>, толщину  $h = 27$  мкм и статическую емкость  $C_0 = 125$  пФ. Этот срез является оптимальным для возбуждения продольных акустических волн и характеризуется высоким значением коэффициента электромеханической связи:  $k = 0.56$  [19].

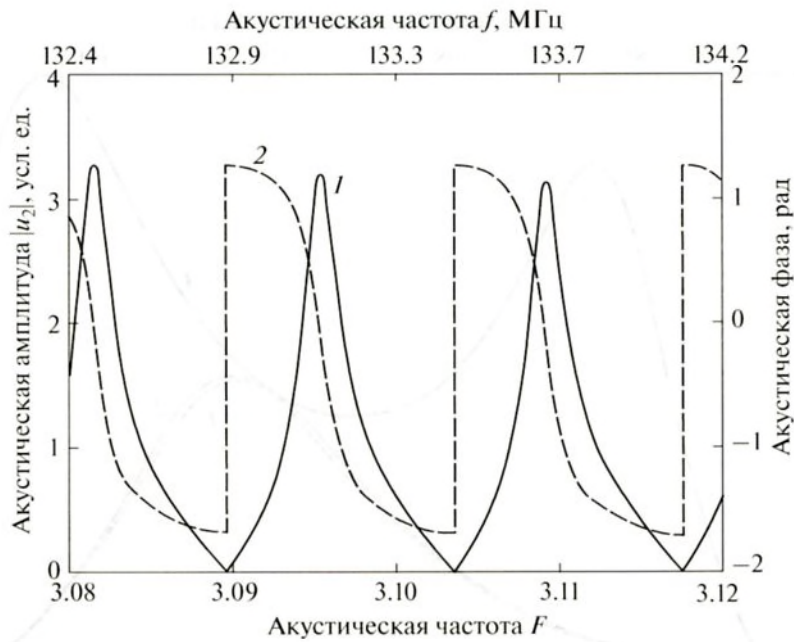


Рис. 4. Зависимость амплитуды (1) и фазы (2) акустической волны в акустическом резонаторе от частоты ультразвука.

В работе рассмотрено два варианта согласования генератора с преобразователем: с помощью последовательной ( $Z_1 = j\Omega L$ ) и параллельной ( $Z_2 = j\Omega L$ ) индуктивности. На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента преобразования для трех вариантов: в отсутствие согласующей индуктивности (кривая 1), а также при подключении последовательной (кривая 2) и параллельной (кривая 3) индуктивности  $L = 13$  нГн. Расчет выполнен в предположении нерезонансной акустической нагрузки из плавящего кварца. Снизу по горизонтальной оси даны значения безразмерной частоты  $F$ , а сверху — значения частоты  $f$  в мегагерцах. Видно, что, например, частоте  $F = 3$  соответствует частота  $f = \Omega/2\pi = 129$  МГц. Из графика следует, что последовательное включение индуктивности практически не меняет характеристику  $\kappa(F)$ . С параллельной индуктивностью ситуация кардинально другая. Изменяются как значения коэффициента преобразования, так и форма характеристики  $\kappa(F)$ . Она становится двугорбой, и, как следствие, существенно расширяется полоса возбуждения ультразвука:  $\Delta F = 2.09$ , что в 2.1 раза больше, чем в отсутствие согласующей индуктивности. Важно также, что при этом увеличивается значение коэффициента преобразования; на частоте  $F = 3.6$  ( $f = 155$  МГц) он достигает 100%. Эксперимент дал такой же результат, в связи с чем дальнейшие исследования были выполнены с параллельной индуктивностью.

#### ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ В СИНХРОНИЗАТОРЕ МОД

Формулы (14) и (15) позволяют для заданных параметров согласующих элементов рассчитать распределение амплитуды и фазы акустической волны в АО-ячейке синхронизатора мод. Результаты такого расчета для  $L = 13$  нГн представлены на рис. 4. Три максимума на амплитудной характеристике 1 относятся к трем акустическим модам с межмодовым частотным расстоянием  $\Delta F = 0.014$ , что соответствует  $\Delta f = 0.59$  МГц. Расчет выполнен для  $X = 0.007$  (вторая пучность стоячей волны от плоскости преобразователя). Фазовая характеристика показана штриховой кривой 2. Скачок фазы на  $\pi$  происходит в тех точках, где амплитуда становится равной нулю. Таким образом, соседние акустические моды сдвинуты по фазе на  $\pi$ .

Рисунок 5 показывает перестройку акустических резонансов при изменении согласующей индуктивности  $L$ . Для этой демонстрации выбран второй резонанс на рис. 4. Видно, что при увеличении индуктивности частота акустического резонанса  $F_r$  монотонно уменьшается. При этом меняется также и форма резонансной кривой, что обусловлено влиянием согласующей индуктивности на форму частотной характеристики пьезопреобразователя (рис. 3). Из рис. 5б, на котором представлена зависимость  $F_r(L)$ , следует, что при изменении индуктивности на  $\Delta L = 31$  нГн (в семь раз) частота резонанса меняется на  $\Delta F_r = 0.0056$ ,

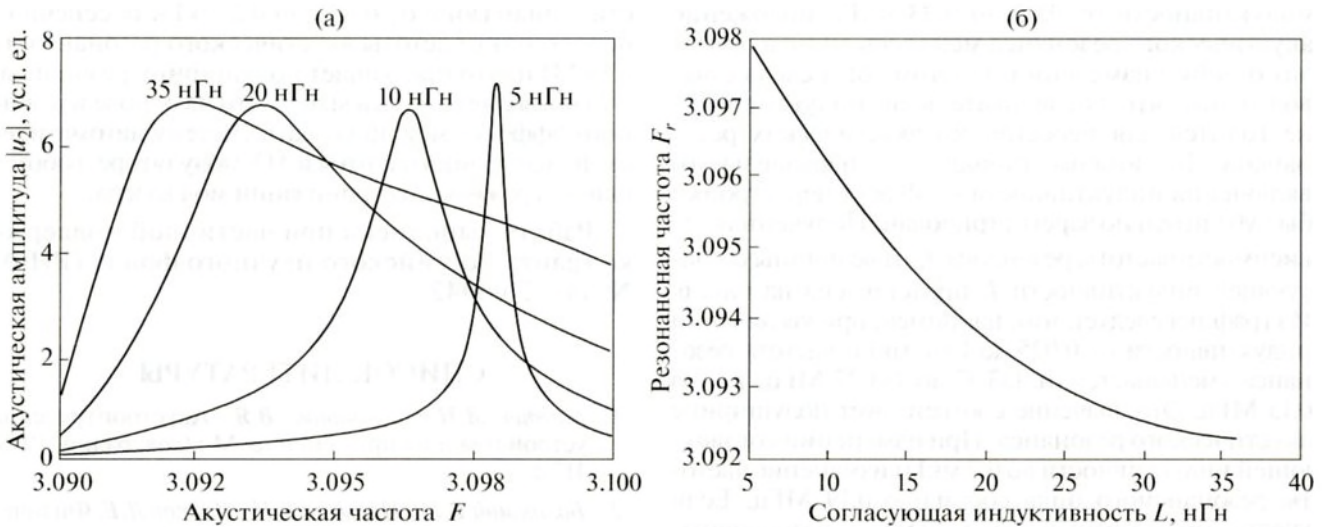


Рис. 5. Перестройка резонансной частоты АО-ячейки с помощью согласующей индуктивности. (а) Частотные характеристики при различных значениях индуктивности, (б) зависимость резонансной частоты от согласующей индуктивности.

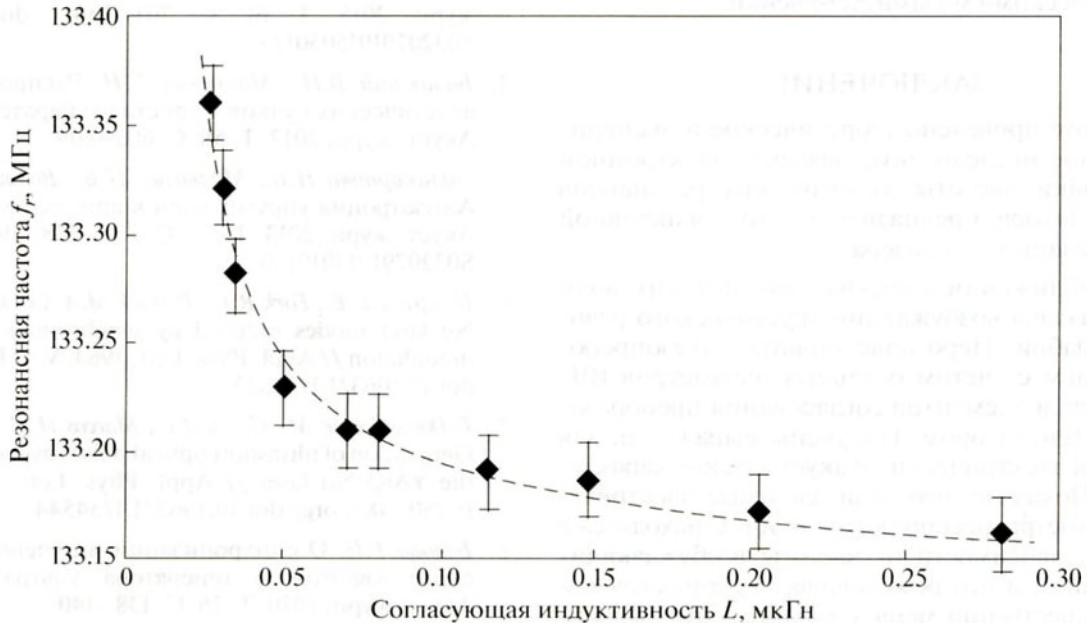


Рис. 6. Экспериментальная зависимость частоты резонансного пика от согласующей индуктивности.

что составляет 0.18%. Это очень небольшое изменение резонансной частоты, однако его надо сопоставить с шириной резонансного пика  $\delta F = 0.0033$  или с межмодовым расстоянием  $\Delta F = 0.014$ . И тогда можно утверждать, что полученного эффекта вполне достаточно для компенсации уходов частоты акустического резонанса в процессе работы АО-модулятора при синхронизации мод лазера.

При экспериментальном исследовании эффекта перестройки частоты акустических резонансов использовался прибор Р4-11. Методика

измерений заключалась в следующем. Сначала в режиме свипирования частоты ВЧ-сигнала выбирался один из акустических резонансов. Затем частотная развертка отключалась и ВЧ-генератор настраивался на максимум выбранного резонансного пика. Частотомером измерялась частота резонанса. Переключением закорачивался пьезопреобразователь, и в таком положении прибором Р4-11 измерялась величина согласующей индуктивности.

Экспериментально изучено два варианта подключения индуктивности: последовательное и параллельное. В первом случае при изменении

индуктивности от 0.03 до 0.33 мкГн положение акустического резонанса менялось лишь в пределах ошибки измерений. Поэтому был сделан вывод о том, что последовательная индуктивность не годится для перестройки акустических резонансов. Во втором варианте — параллельного включения индуктивности — эффект перестройки был убедительно зарегистрирован. Полученная зависимость частоты резонанса  $f_r$  от величины согласующей индуктивности  $L$  представлена на рис. 6. Из графика следует, что, например, при увеличении индуктивности от 0.025 до 0.07 мкГн частота резонанса уменьшается от 133.37 до 133.22 МГц, т.е. на 0.15 МГц. Это значение соответствует полуширине акустического резонанса. При изменении согласующей индуктивности до 0.2 мкГн изменение частоты резонансного пика составило 0.19 МГц. Если учесть, что частотный диапазон между резонансными пиками, в соответствии с экспериментом, оказался равным  $580 \pm 10$  кГц, то предел перестройки частоты составил 31% от частотного интервала между акустическими модами АО-ячейки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование эффекта электронной перестройки частоты акустических резонансов АО-модулятора, предназначенного для активной синхронизации мод лазера.

В приближении плоских акустических волн решена задача возбуждения акустического резонатора Фабри—Перо пластинчатым пьезопреобразователем с учетом реальных параметров ВЧ-генератора и элементов согласования преобразователя с генератором. Получены выражения для основных электрических и акустических характеристик. Показано, что эквивалентные электрические параметры преобразователя  $R$  и  $C$  находятся в сложной зависимости от частоты возбуждающих колебаний  $\Omega$  и что резонансная акустическая нагрузка существенно меняет характер этих зависимостей по сравнению с нерезонансной нагрузкой.

Проведенный теоретический анализ подтвердил существование ранее экспериментально обнаруженного эффекта сдвига частоты акустических резонансов при изменении согласующих электрических элементов. Установлено, что причиной эффекта является изменение фазы акустической волны на границе акустического резонатора с пьезопреобразователем, что эквивалентно изменению длины резонатора  $l$ . Вследствие этого меняются и собственные частоты резонатора [18, 20].

В эксперименте использовалась АО-ячейка из плавленого кварца с преобразователем из ниобата лития, работавшим в диапазоне частот от III до 158 МГц. Изменение согласующей индуктивно-

сти в диапазоне от 0.025 до 0.2 мкГн обеспечило перестройку частоты акустического резонанса на 0.19 МГц, что превышает полуширину резонанса. Это позволяет сделать вывод, что на основе изученного эффекта можно создать систему автоматической подстройки частоты в АО-модуляторе, работающем в режиме синхронизации мод лазера.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 14-22-00042.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.
2. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
3. *Котов В.М.* Брэгговская дифракция трехцветного излучения в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2015. Т. 61. С. 701–704. doi 10.7868/S0320791915050123
4. *Балакиев В.И., Манцевич С.Н.* Распространение акустических пучков в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2012. Т. 58. С. 600–609.
5. *Поликарпова Н.В., Мальнева П.В., Волошинов В.Б.* Анизотропия упругих волн в кристалле теллура // Акуст. журн. 2013. Т. 59. С. 332–338. doi 10.7868/S0320791913010140
6. *Hargrove L.E., Fork R.L., Pollack M.A.* Locking of He–Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation // Appl. Phys. Lett. 1964. V. 5. P. 4–5. org/doi 10.1063/1.1754025
7. *DiDomenico Jr. M., Geusic J.E., Marcos H.M., Smith R.G.* Generation of ultrashort optical pulses by mode locking the YAlG:Nd laser // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8. P. 180–183. org/doi 10.1063/1.1754544
8. *Белова Г.Н.* О синхронизации излучения оптического квантового генератора ультразвуком // Акуст. журн. 1970. Т. 16. С. 138–140.
9. *Spears K.G., Larsen J.* Design of an acousto-optic modulator and driver // Rev. Sci. Instrum. 1977. V. 48. P. 472–475. doi 10.1063/1.1135053
10. *Keller U., Li K.D., Khuri-Yakub B.T., Bloom D.M.* High-frequency acousto-optic mode locker for picosecond pulse generation // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 45–47. doi 10.1364/OL.15.000045
11. *Eichler H.J., Barocsi A., Jakob L., Liu B.* Acousto-optic mode-locker for Nd:lasers using paratellurite // Appl. Phys. B. 1991. V. 53. P. 194–197. doi 10.1007/BF00330236
12. *Арамян А.Р., Галечян Г.А., Манукян Г.В.* Газовый лазер, управляемый акустической волной // Акуст. журн. 2008. Т. 54. С. 895–899.
13. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.

14. *Foster N.F., Coquin G.A., Rozgonyi G.A., Vannatta E.A.* Cadmium sulphide and zinc oxide thin-film transducers // *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1968. V. SU-15. P. 28–35. doi 10.1109/T-SU.1968.29443
15. *Balakshy V.I., Linde B.B.J., Vostrikova A.N.* Acousto-optic interaction in a non-homogeneous acoustic field excited by a wedge-shaped transducer // *Ultrasonics.* 2008. V. 48. P. 351–356. doi 10.1016/j.ultras.2008.01.001
16. *Balakshy V.I., Revenko A.V.* Acousto-optic interaction in cells with wedge-shaped transducers excited at high harmonics // *Acta Acustica – Acustica.* 2010. V. 96. P. 837–842. dx.doi.org/ doi 10.3813/AAA.918342
17. *Толпиов Х.Б.* Стоячие волны в упругой клиновидной пластине // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. С. 502–507. doi 10.7868/S0320791913040163
18. *Magdich L.N., Balakshy V.I., Mantsevich S.N.* Electronic tuning of acoustic resonances in acousto-optic mode lockers // *Appl. Acoust.* 2016. V. 112. P. 217–220. doi 10.1016/j.apacoust.2016.04.015
19. *Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. Шаскольской М.П.* М.: Наука, 1982. 632 с.
20. *Кучерявая Е.С., Мансфельд Г.Д., Свешиников Б.В., Фреик А.Д.* О возможности управления частотой составных резонаторов на объемных акустических волнах // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. С. 346–348.