

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

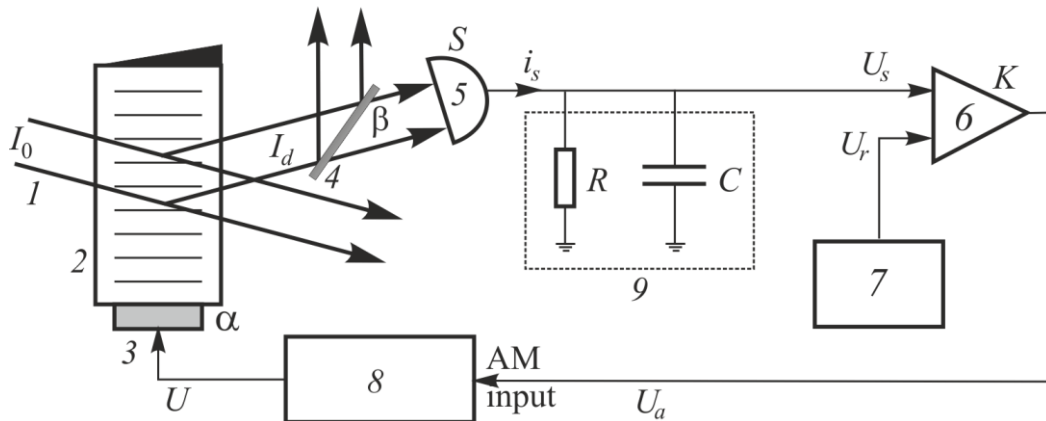
С.Н. Манцевич, В.И. Балакший, Ю.И. Кузнецов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

manboxx@mail.ru

Среди большого разнообразия акустооптических (АО) устройств особый интерес представляют АО системы с обратной связью [1-7]. Обратная связь позволяет улучшить характеристики известных устройств и создать новые устройства для лазерной физики и оптической обработки информации [3-5]. Одним из перспективных направлений применения подобных систем является стабилизация мощности лазерного излучения. Проблема обусловлена сравнительно низкой стабильностью выходной интенсивности излучения некоторых типов лазеров. Основу регулирующего устройства системы стабилизации составляет оптический модулятор. В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования системы стабилизации интенсивности лазерного пучка, основанной на АО эффекте.

Блок-схема системы стабилизации интенсивности лазерного излучения представлена на рис. 1.



1 – падающий световой пучок, 2 – АО ячейка, 3 – пьезопреобразователь, 4 – светоделитель, 5 – фотоприемник, 6 – дифференциальный усилитель, 7 – источник опорного напряжения, 8 – ВЧ генератор, 9 – RC блок

Рис. 1. Принципиальная схема системы стабилизации интенсивности лазерного пучка.

Лазерный пучок  $I$  с интенсивностью  $I_0$ , проходя через АО ячейку 2, дифрагирует на бегущей акустической волне, возбуждаемой пьезопреобразователем 3. Часть протифрагировавшего излучения  $I_d$ , прошедшего через светоделитель 4, регистрируется фотоприемником 5, сигнал с которого  $U_s$  поступает на один из входов дифференциального усилителя 6. На другой

вход усилителя подается постоянное опорное напряжение  $U_r$  с источника 7. Усиленный разностный сигнал  $U_a = K(U_s - U_r)$  подается на вход амплитудной модуляции ВЧ генератора гармонических колебаний 8. Таким образом, пьезопреобразователь возбуждается ВЧ сигналом, амплитуда которого  $U$  управляется сигналом ошибки  $U_a$ . Поскольку интенсивность дифрагированного света  $I_d$  определяется амплитудой акустической волны, то при правильном выборе знака коэффициента усиления  $K$  можно получить эффект стабилизации интенсивности  $I_d$ . Опорное напряжение  $U_r$  позволяет оптимальным образом выбрать положение рабочей точки на модуляционной характеристике АО ячейки.

АО ячейка работает в брэгговском режиме дифракции, поэтому:

$$I_d(t) = I_0 \zeta(t) = I_0 \sin^2[\alpha U(t - \tau)], \quad (1)$$

где  $\zeta$  – эффективность дифракции, а коэффициент  $\alpha$  определяется характеристиками пьезопреобразователя и материала ячейки [1]. Формула (1) учитывает время запаздывание сигнала  $\tau = d/V$ , где  $d$  – расстояние от преобразователя до светового пучка,  $V$  – скорость звука. В системе стабилизации интенсивности света лишь небольшая часть дифрагированного излучения  $\beta \ll 1$  может использоваться для формирования сигнала обратной связи. Поэтому:

$$i_s(t) = \beta S I_d = \beta S I_0 \sin^2[\alpha U(t - \tau)] = \frac{U_s(t)}{R} + C \frac{dU_s(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $S$  – токовая чувствительность фотоприемника.

Предполагая линейность модуляционной характеристики ВЧ генератора, можно записать:

$$U = U_0 - \gamma K(U_s - U_r), \quad (3)$$

где  $\gamma$  – крутизна модуляционной характеристики.

Объединяя уравнения (1)-(3) и переходя к безразмерным параметрам:

$$T = \frac{t}{\tau}; \quad b = \frac{RC}{\tau}; \quad \bar{U}_0 = \alpha U_0; \quad \bar{U}_r = \alpha U_r; \quad \bar{U}_s = \alpha U_s; \quad \bar{I}_0 = \alpha \beta R S I_0; \quad \bar{I}_d = \alpha \beta R S I_d,$$

получим:

$$b \frac{d\bar{U}_s(T)}{dT} = -\bar{U}_s(T) + \bar{I}_0 \sin^2 \{ \bar{U}_0 - \gamma K [\bar{U}_s(T-1) - \bar{U}_r] \}. \quad (4)$$

Соотношение (4) полностью описывает поведение системы и все разнообразие возможных в ней динамических режимов: 1) статические состояния; 2) автоколебательный режим; 3) автомодуляционный режим; 4) режим хаотических колебаний [7].

Расчет уравнения (4) позволил построить бифуркационные диаграммы, на которых каждая точка определяет колебательный режим, соответ-

ствующий данному набору параметров системы. Наибольшее богатство режимов имеет место на склонах нелинейной характеристики АО взаимодействия  $\zeta(U)$  [7]. В этих областях при увеличении коэффициента усиления  $K$  система переходит от статического режима к автоколебательному, затем к автомодуляции и хаосу.

Для создания системы стабилизации используется статический режим работы. Из (2) следует, что  $\bar{U}_s = \alpha\beta SR I_d = \bar{I}_d$ . Поэтому (4) запишем в виде:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_d \sin^{-2}[\bar{U}_0 - \gamma K(\bar{I}_d - \bar{U}_r)]. \quad (5)$$

Коэффициент стабилизации:  $\kappa = \Delta\bar{I}_{d0}/\Delta\bar{I}_d$ , где  $\Delta\bar{I}_{d0}$  и  $\Delta\bar{I}_d$  – изменения интенсивности дифрагированного света при разомкнутой и замкнутой цепи обратной связи, вызванные изменением интенсивности падающего излучения. Рабочую точку на модуляционной характеристике АО ячейки  $\zeta(\bar{U})$  выберем так, чтобы сигнал ошибки  $\bar{I}_d - \bar{U}_r = 0$ . Тогда:

$$\Delta\bar{I}_{d0} = \Delta\bar{I}_0 \sin^2 \bar{U}_0; \quad \Delta\bar{I}_d = \frac{\sin^2 \bar{U}_0}{1 + \bar{I}_0 \gamma K \sin(2\bar{U}_0)} \Delta\bar{I}_0; \quad \kappa = 1 + \bar{I}_0 \gamma K \sin(2\bar{U}_0). \quad (6)$$

Поскольку интересен только случай  $\kappa \gg 1$ , получаем окончательно:

$$\kappa \approx I_0 \alpha \beta \gamma K S R \sin(2\alpha U_0) \equiv I_0 G \sin(2\alpha U_0). \quad (7)$$

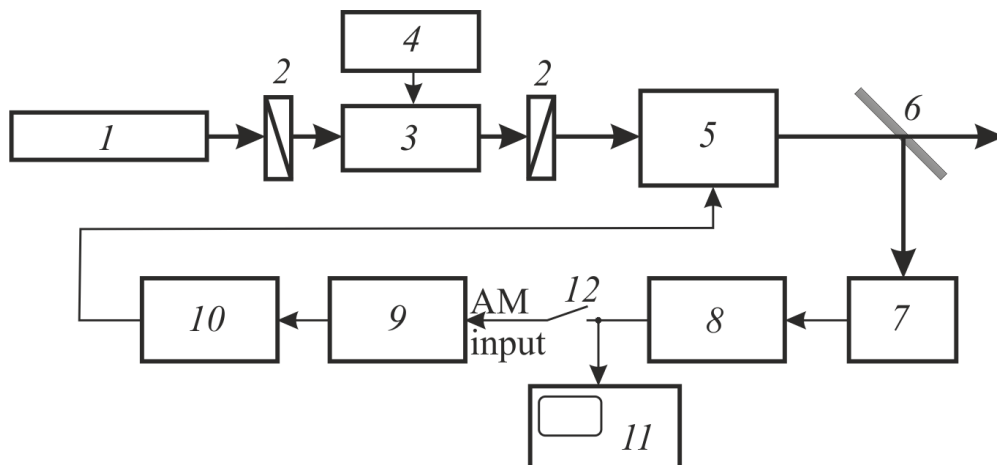
Параметр  $G$  описывает последовательное преобразование сигнала ошибки в цепи обратной связи. Из (7) следует, что теоретически можно получить любое значение коэффициента стабилизации  $\kappa$ . Однако при достаточно больших значениях параметра  $G$  в системе могут возбуждаться колебания. Увеличивая постоянную времени цепи обратной связи  $RC$ , колебания можно устранить. Важным вопросом является также величина световых потерь в системе стабилизации. В рассматриваемом варианте потери света определяются выбором рабочей точки на модуляционной характеристике АО ячейки. Максимальный коэффициент стабилизации получается при выборе рабочей точки на середине линейного участка характеристики  $\zeta(\bar{U})$ , т.е. при  $\alpha U_0 = \pi/4$ ; в этом случае  $\zeta = 50\%$ . Если оптимизировать систему по произведению  $\zeta \cdot \kappa$ , то оптимуму соответствует рабочая точка  $\alpha U_0 = 0.33\pi$ . При этом  $\zeta = 75\%$ , а коэффициент стабилизации составляет 87% от максимального значения.

Экспериментально была реализована система стабилизации на основе АО ячейки, изготовленной из кристалла парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ). В ячейке по оси [110] кристалла возбуждалась акустическая волна в виде сдвиговой моды. Максимальная эффективность дифракции ( $\zeta \approx 80\%$ ) достигалась при напряжении на преобразователе  $U = 6$  В. В рабочей точке  $U_0 = 4$  В, выбранной для системы стабилизации, эффективность дифракции была равна 65% на длине волны оптического излучения 0.63 мкм. Для моделирования флуктуаций интенсивности излучения лазера использовался элек-

трооптический модулятор (рис. 2).

Эксперименты проводились на частоте ультразвука 56 МГц. При создании системы стабилизации были учтены фазо-частотные характеристики всех элементов цепи обратной связи с тем, чтобы обратная связь в полосе рабочих частот была отрицательной.

Экспериментально получен результат: в полосе частот от 15 до 180 Гц максимальный коэффициент стабилизации был равен  $\kappa = 78 \pm 5$ .



1 – He-Ne лазер, 2 – поляризаторы, 3 – электрооптический модулятор, 4 – звуковой генератор, 5 – АО ячейка, 6 – светоделитель, 7 – фотоприемник с трансимпедансным усилителем, 8 – НЧ усилитель, 9 – ВЧ генератор, 10 – ВЧ усилитель мощности, 11 – осциллограф, 12 – ключ.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

## ЛИТЕРАТУРА

1. Chrostowski J., Delisle C. // Opt. Commun., 1982. V. 41. № 2. P. 71.
2. Poon T.-C., Cheung S.K. // Appl. Opt., 1989. V. 28. № 22. P. 4787.
3. Балакший В.И., Казарьян А.В., Молчанов В.Я. // Радиотехника и электроника, 1992. Т. 37. № 6. С. 1140.
4. Balakshy V.I., Kazaryan A.V. // Opt. Eng., 1999. V. 38. № 7. P. 1154.
5. Балакший В.И., Нагаева И.А. // Квантовая электроника, 1996. Т. 23. № 3. С. 261.
6. Балакший В.И., Синев И.М. // Квантовая электроника, 2004. Т. 34. № 3. С. 277.
7. Балакший В.И., Бычков А.И., Кузнецов Ю.И., Шабунин С.А. // Радиотехника и электроника, 2005. Т. 50. № 9. С. 1169.