

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. Г. Басов, А. З. Грасюк, И. Г. Зубарев, Регенеративный оптический квантовый усилитель, *Докл. АН СССР*, 1964, том 157, номер 5, 1084–1087

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

17 марта 2025 г., 07:29:31



Член-корреспондент АН СССР Н. Г. БАСОВ, А. З. ГРАСЮК,
И. Г. ЗУБАРЕВ

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КВАНТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Как и во всяком квантовом усилителе (1^{-3}), усиление в оптическом квантовом усилителе происходит за счет индуцированного излучения в некоторой среде с отрицательной температурой. Настоящая работа содержит основные результаты исследования чувствительных регенеративных оптических квантовых усилителей (РОКУ), т. е. оптических усилителей с положительной обратной связью.

1. Экспериментальная установка. Исследования РОКУ производились с помощью установки, блок-схема которой представлена на рис. 1. В качестве источника сигнала использован ОКГ на рубине с модули-

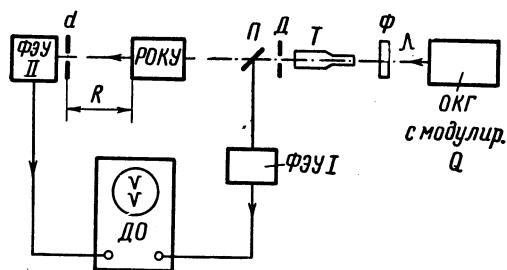


Рис. 1. Блок-схема установки

рованной добротностью (4). Модуляция добротности в задающем генераторе (один пичок излучения) значительно облегчала измерения, так как были заранее известны форма, длительность, энергия, а следовательно, и мощность усиливаемого сигнала. Кроме того, модуляция добротности в задающем ОКГ позволяла точно локализовать усиливаемый сигнал во времени, что

облегчило исследование временной характеристики ОКУ. Ослабление сигнала ОКГ производилось нейтральными светофильтрами Φ , которые предварительно калибровались. Для уменьшения расходимости пучка сигнала использовался коллиматор T (теодолит). Диаметр усиливаемого луча регулировался ирисовой диафрагмой D . РОКУ работал в двух режимах: без модуляции добротности резонатора и с модуляцией последней.

В качестве приемников использовались фотоумножители, регистрация сигналов производилась на двухлучевом осциллографе. Для временной синхронизации поджига ламп ОКГ и РОКУ с разверткой осциллографа использовалось хронизирующее устройство.

2. Коэффициент усиления некоторых схем регенеративных ОКУ. В ОКУ с резонатором обычного плоского типа ввод усиливаемого сигнала производился непосредственно через полупрозрачное зеркало с коэффициентом отражения r_1 , а вывод — через второе зеркало с коэффициентом отражения r_2 . Коэффициент усиления мощности такой системы G есть

$$G = \frac{k(1-r_1)(1-r_2)}{1-k^2r_1r_2}, \quad (1)$$

где k — коэффициент усиления на проходе (5).

Практически удобнее выводить энергию из резонатора с помощью вспомогательной пластинки с коэффициентом отражения r , расположенной внутри резонатора. Коэффициент усиления при суммировании обоих выходов РОКУ есть

$$G = \frac{(1-r_1)r}{1-k^2(1-r)r_1} [1 + k^2(1-r)]. \quad (2)$$

Такие системы просты в настройке, однако необходимо весьма точно подбирать величины k , r_1 , r_2 и r , чтобы G имел заданную величину при сильной

регенерации. Кроме того, подход к порогу генерации в таких схемах весьма критичен и получение высокого коэффициента усиления при большой регенерации представляет собой довольно трудную задачу.

Решение ее значительно облегчается при использовании в качестве резонатора РОКУ однонаправленной схемы, представленной на рис. 2. В такой схеме усиливаемый луч в резонаторе идет по замкнутому пути (например, по треугольнику) в одном направлении. Ввод усиливаемого сигнала осуществляется через полупрозрачное зеркало с коэффициентом отра-

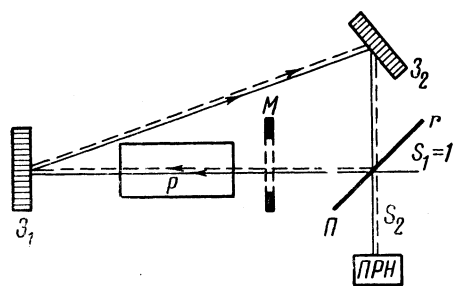


Рис. 2. Однонаправленная схема РОКУ. Z_1, Z_2 — плотные зеркала; P — активная среда; Π — полупрозрачное зеркало с коэффициентом отражения r ; ПРН — оптический приемник (ФЭУ), M — система модуляции добротности; S_2 — выходной сигнал

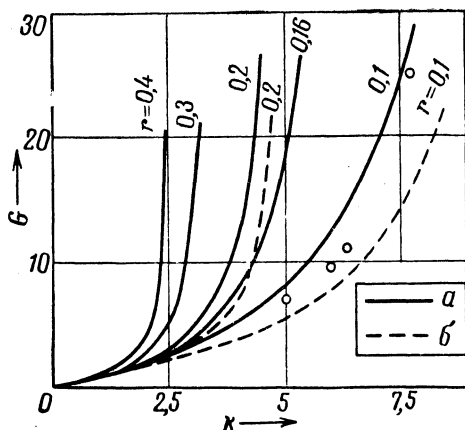


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления по мощности G от коэффициента усиления на проходе для различных значений обратной связи r (коэффициента отражения полупрозрачного зеркала). a — теоретические кривые для однонаправленной схемы РОКУ; b — теоретические кривые для плоского резонатора, точки — экспериментальные ($r = 0,1$) для РОКУ по схеме рис. 2

жения r . Такая направленная схема РОКУ имеет ряд преимуществ перед предыдущими. Действительно, коэффициент усиления РОКУ в этом случае есть

$$G = r + \frac{k(1-r)^2}{1-kr}, \quad (3)$$

т. е. $G > 1$ при любых $k > 1$ и $0 < r < 1$. Кроме того, в знаменателе (3) произведение kr входит линейно. Поэтому подход к порогу генерации является более «мягким». Другими словами, такая схема менее критична к флуктуациям k и r , что значительно облегчает получение стабильного коэффициента усиления.

Далее, так как вход и выход такой системы пространственно разделены, а усиливаемый сигнал идет по одному направлению, то можно осуществлять последовательное включение нескольких таких усилителей без специальных развязок между каскадами. Блок-схема для измерений коэффициента усиления соответствует рис. 1. Как уже отмечалось, в качестве источника использовался ОКГ с модулированной добротностью. Пройдя через калиброванный ослабительный фильтр Φ , коллиматор T и диафрагму D , усиливаемый сигнал поступал в РОКУ и после усиления попадал в ФЭУ-II, который использовался в качестве приемника. Часть сигнала перед РОКУ отвлекалась с помощью пластинки Π на фотоумножитель ФЭУ-I, который использовался для контроля величины входного сигнала. Сигнал с выхода обоих ФЭУ подавался на двухлучевой осциллограф $ДО$, осциллограммы фотографировались. Такая методика позволила измерить как G , так и k (коэффициент усиления на одном проходе), определить стабильность G и k , а также их зависимость от различных параметров. Такими параметрами были: энергия накачки, время накачки (интервал времени между поджигом лампы РОКУ и приходом усиливаемого сигнала), коэффициент обратной

связи, определяемый величиной коэффициента отражения зеркала r . Результаты измерений ($r=0,1$) для схемы РОКУ, соответствующей рис. 2, приведены на рис. 3 и 4 вместе с теоретическими кривыми и показали удовлетворительное совпадение с последними.

3. Стабилизация коэффициента усиления в РОКУ методом модуляции добротности резонатора. Весьма перспективным способом улучшения параметров регенеративного ОКУ является модуляция обратной связи в резонаторе (модуляция добротности). Модуляция добротности позволяет заранее готовить состояние с отрицательной температурой. Это устраняет флуктуации коэффициента

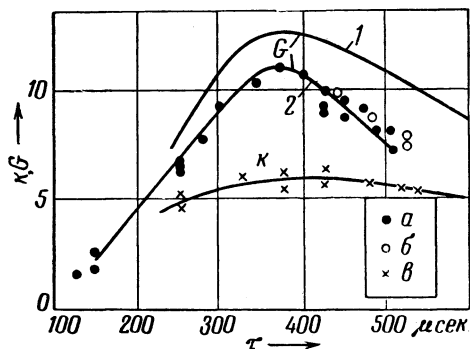


Рис. 4. Зависимость коэффициентов усиления по мощности k и G (1 — теория, 2 — эксперимент) от времени накачки усиливающего кристалла. Экспериментальные точки: a — без модуляции добротности резонатора РОКУ; b — с модуляцией добротности резонатора РОКУ; v — при измерении k

та усиления на проходе (а следовательно, и общего коэффициента усиления РОКУ), так как в этом случае G не зависит от мощности накачки и определяется энергией, запасенной в кристалле к моменту прихода сигнала. Кроме того, состояние с отрицательной температурой при отсутствии обратной связи сохраняется дольше, чем при наличии последней, что достаточно ясно из физических соображений. Другими словами, метод модуляции добротности позволяет «удержать» состояние с отрицательной температурой до прихода усиливаемого сигнала, разумеется, если это время не превышает радиационного времени жизни активных частиц в свободном пространстве.

Результаты соответствующих измерений представлены на рис. 4. Как видно из этого рисунка, коэффициент усиления для РОКУ без модуляции добротности убывает во времени быстрее, чем соответствующий коэффициент усиления для РОКУ с модуляцией добротности.

4. Чувствительность ОКУ. Измерение чувствительности ОКУ проводилось по схеме, аналогичной таковой для измерения коэффициента усиления (рис. 1). Разница заключалась в том, что расстояние R от выхода РОКУ до приемного фотоумножителя ФЭУ-II выбиралось максимально возможным, чтобы уменьшить влияние спонтанного излучения возбужденного кристалла, идущего в неаксиальные моды резонатора РОКУ. Этой же цели служила приемная диафрагма d . Для устранения фона лампы накачки последняя гасилась специальным устройством в момент, предшествующий приему. Оценку значения чувствительности такой системы можно сделать следующим образом. Угловая апертура рассматриваемого приемного устройства есть $\Omega = (d/R)^2$. Максимальный порядок неаксиальной моды, попадающей в угол Ω , определяется из соотношения

$$\frac{m\lambda}{b} \leq \frac{d}{R},$$

где b — поперечные размеры резонатора, λ — длина волны.

Если учесть, что угловое расстояние между неаксиальными модами есть λ/b , то число неаксиальных мод, соответствующее каждой аксиальной моде, есть $(\frac{d/R}{\lambda/b})^2$. Общее число мод, соответствующее угловой апертуре приемного устройства, будет

$$N \approx N_a \left(\frac{d/R}{\lambda/b} \right)^2, \quad (4)$$

где $N_a = \frac{\Delta\nu_l}{c/2L}$ — число аксиальных мод; L — длина резонатора; $\Delta\nu_l$ — ширина линии; c — скорость света. Подставляя в (4) значения $\Delta\nu_l$, L , d , R , λ , b , получаем значение N . Ожидаемое значение чувствительности в этом случае (при отношении сигнал/шум ~ 1) будет, в соответствии с (3),

$$P_{\text{ш}} = Nh\nu\Delta\nu_p. \quad (5)$$

Подставляя в это выражение значение $\Delta\nu_p$ (что соответствует добротности резонатора $Q = \frac{\nu}{\Delta\nu_p}$), получим величину мощности шумов в резонаторе, попадающих в приемник.

Измерения показали, что РОКУ чувствует сигнал, мощность которого (при отношении сигнал/шум на выходе приемника ~ 1) одного порядка с теоретическим значением, подсчитанным по формуле (5).

5. Измерение полосы пропускания РОКУ. Измерение полосы пропускания ОКУ проводилось по методу, аналогичному принятому в радиотехнике: изменялась частота генератора и измерялась зависимость коэффициента усиления от частоты. Для изменения частоты генерации ОКГ использовался температурный сдвиг линии в рубине (6) при охлаждении кристалла. По измеренной зависимости коэффициента усиления от температуры $G(T)$ определялась полоса пропускания усилителя

$$\Delta\nu_{\text{РОКУ}} = 2(\nu_0 - \nu)|_{G=1/2G_0},$$

где ν_0 — частота, соответствующая середине центральной части линии при комнатной температуре; ν — частота генерации, определяемая температурой охлажденного генераторного кристалла; G_0 — коэффициент усиления при одинаковой (комнатной) температуре усилительного и генераторного кристаллов.

Измерения показали, что полоса РОКУ при $G = 25$ составляет 5 см^{-1} .

Авторы выражают благодарность В. С. Зуеву, П. Г. Крюкову и В. И. Свергуну за помощь в работе.

Поступило
18 II 1964

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, УФН, **57**, в. 3, 485 (1955). ² Н. Г. Басов, Диссертация, Физ. инст. им. П. Н. Лебедева АН СССР, 1956. ³ Г. М. Зверев, Н. В. Карлов и др., УФН, **77**, 81 (1962). ⁴ Н. Г. Басов, В. С. Зуев, П. Г. Крюков, ЖЭТФ, **43**, в. 7 (1962). ⁵ J. E. Geusic, H. E. D. Scovil, Bell. Syst. Techn. J., **41**, 1371 (1962), Лазеры, сборн. ст., ИЛ, 1963. ⁶ D. E. Mc Cumber, M. D. Sturge, J. Appl. Phys., **34**, 1682 (1963) (Краткий перевод: экспресс-инф., Радиотехника СВЧ, № 41, 6 XI 1963 г.)