

**ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ
В "ПРОДОЛЬНОМ НЕАКСИАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ"
ПРИ ОДНОМОДОВОЙ И ОДНОЧАСТОТНОЙ
НАКАЧКЕ НЕОДИМОВЫМ ЛАЗЕРОМ**

В. В. Бочаров, И. Г. Зубарев

При теоретическом рассмотрении вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в резонаторе обычно предполагается, что возбуждающее излучение, а также возникающее стоксово излучение, является одномодовым и одночастотным /1,2,3/ Однако в экспериментах по возбуждению ВКР до последнего времени, как правило, использовались многомодовые лазеры. При фокусировке их излучения в кювету с рабочим веществом создается неоднородное распределение интенсивности накачки по поперечному сечению резонатора ВКР-лазера. Использование продольной неаксиальной накачки /1,2,4,5/, когда возбуждающее излучение распространяется под небольшим углом к оси резонатора ВКР-лазера, приводит к сглаживанию вышеупомянувшейся неоднородности, однако полностью ее устранить не может.

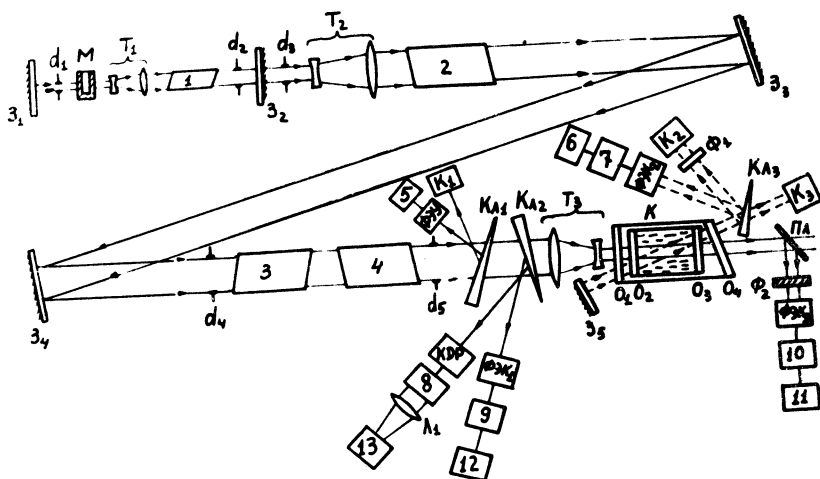
Данная работа посвящена изучению ВКР-лазера с "продольным неаксиальным резонатором" при одномодовой и одночастотной накачке неодимовым ОКГ. В качестве активного вещества лазера на ВКР был выбран жидкий азот. Экспериментальные результаты по возбуждению ВКР-лазера многомодовым излучением неодимового ОКГ приведены в работе /2/. Там получена эффективность преобразования накачки $\sim 20\%$ при расходимости стоксова излучения из резонатора $3 \cdot 10^{-3}$

рад. В данной работе геометрия опыта, кювета с жидким азотом, а также зеркала лазера на ВКР были теми же самыми, что и в работе /2/.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника накачки использовалась система из одномодового и одночастотного задающего генератора и трех каскадов усиления. Резонатор лазера на ВКР имел длину 60 см и был образован выходным окном кювета O_4 (рис. 1) и зеркалом Z_5 . Его ось составляла угол $1 - 1,5^\circ$ с направлением распространения возбуждающего излучения.

В течение всех экспериментов во время каждой вспышки фотографировался спектр, форма импульса, а также измерялась энергия импульса возбуждающего излучения неодимового лазера. Непосредственно измерить ширину линии неодимового ОКГ имеющимся эталоном не удалось; но поскольку расстояние между аксиальными типами колебаний в задающем лазере равнялось $5 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$ и ширина аппаратной функции эталона также равнялась $5 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$, то отсюда следует, что действительная ширина линии излучения неодимового ОКГ $\Delta\nu_n \lesssim 5 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$.

Характерная форма импульса возбуждающего излучения показана на рис. 2а; длительность импульса оставалась практически постоянной в течение опытов и равнялась $\tau_n \approx 20$ нсек. На рис. 2б показана форма импульса возбуждающего излучения, прошедшего через кювету с жидким азотом. Сравнение рис. 2а и рис. 2б показывает, что значительная часть импульса возбуждающего излучения "переработалась" в стоксовы компоненты. Осциллограмма импульса излучения ВКР-лазера на длине волны первой стоксовой компоненты показана на рис. 2в. Характерным является уменьшение длительности импульса генерации лазера на ВКР (практически в два раза) по сравнению с импульсом накачки, очень крутой передний фронт (как правило меньше или порядка одной наносекунды) и пологий задний фронт; на спаде импульса видна характерная модуляция (рис



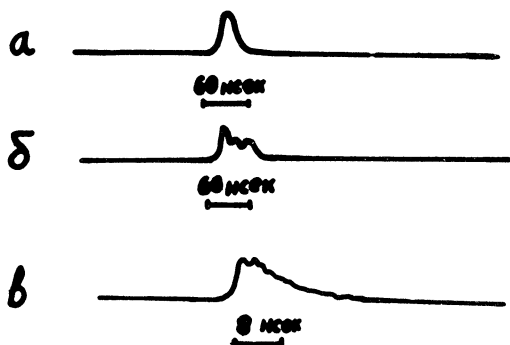
Р и с. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования генерации на ВКР в резонаторе с одномодовой неаксиальной накачкой. $3_1, 3_2$ - зеркала задающего неодимового ОКГ; $d_1 - d_5$ - диафрагмы; M - фототропный затвор; T_1, T_2, T_3 - телескопы с увеличением $3\times, 3\times$ и $4\times$ соответственно; $2-4$ - усилительные стержни из неодимового стекла; $3_3, 3_4$ - поворотные зеркала с $R_3, R_4 = 99\%$, 3_5 - зеркало резонатора ВКР-лазера с коэффициентами отражения $r_{1s} = 92\%$ и $r_{2s} = 5\%$; K - кювета с жидким азотом; 0_1-0_4 - окна кюветы, длина активной части которой $l = 20$ см; K_1-K_3 - калориметры; Φ_1, Φ_2 - избирательные фильтры; $K\lambda_1-K\lambda_3$ - оптические клинья; $Пл$ - плоскопараллельная стеклянная пластинка; L_1 - телеобъектив с $f = 30$ см; 5 - запоминающий осциллограф С-1-29; $6, 11-13$ - фотоаппараты; $7, 9, 10$ - осциллографы И-2-7; 8 - эталон Фабри-Перо с трехсантиметровым промежутком.

2в), свидетельствующая о многомодовости излучения и, следовательно, о неустановившемся характере генерации комбинационного лазера /3/.

При стационарном режиме генерации ВКР-лазера его КПД равен /1/

$$\eta = \frac{\lambda_n}{\lambda_{1s}} \frac{\tau_\phi}{\tau_p}, \quad (1)$$

где τ_p , τ_ϕ - времена жизни фотона в резонаторе, обусловленные соответственно только пропусканием зеркал



Р и с. 2. Осциллограммы импульсов.

а - импульс возбуждающего излучения ($\lambda_n = 1,06$ мк) до кюветы с жидким азотом; б - импульс возбуждающего излучения, прошедшего кювету с жидким азотом; в - импульс излучения генерации на длине волны первой стоксовой компоненты ($\lambda_{1s} = 1,41$ мк).

резонатора и пропусканием зеркал, а также потерями излучения внутри резонатора. Однако в связи с малой длительностью импульса накачки режим генерации является не стационарным, и поэтому интенсивность накачки должна удовлетворять следующему условию /2/

$$I_n > I_{пор} = I_{пор}^{(ср)} + \frac{1}{N} \frac{\ln K}{gI}, \quad (2)$$

где $I_{\text{пор}}^{(\text{ст})} = (1/2L)\ln(1/r)$ - стационарное значение пороговой интенсивности накачки; r - коэффициент отражения выходного зеркала резонатора; L - длина резонатора ВКР-лазера; $N = \tau_n v/L$ - число проходов стоксовых фотонов в резонаторе; v - скорость света в среде; g - усиление стоксова излучения (см/мвт); K - коэффициент, который показывает, во сколько раз необходимо усилить мощность спонтанного комбинационного рассеяния, чтобы она достигла детектируемого уровня. Вводя обозначения $I_n \tau_n = E_n$ (дж/см²) и $E_0 = (L \ln K / v g l)$ после несложных преобразований запишем (2) в виде

$$E_n > E_{\text{пор}} = E_0 / (1 - I_{\text{пор}}^{(\text{ст})} / I_{\text{пор}}). \quad (3)$$

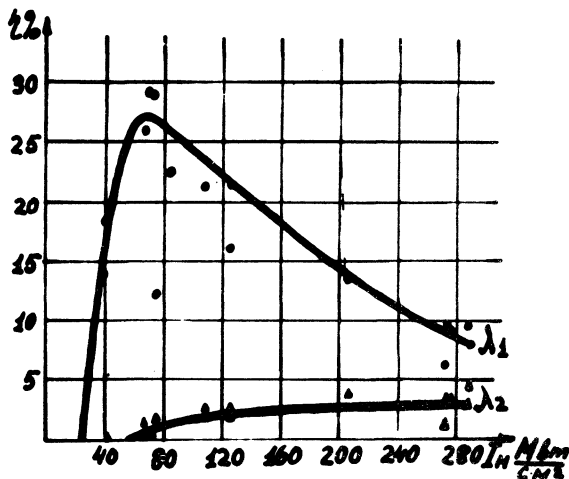
Поэтому в выходное стоксово излучение ВКР-лазера можно преобразовать только ту часть энергии импульса накачки $E_n = E_n S$ (дж), где S - площадь поперечного сечения пучка накачки в резонаторе ВКР-лазера, которая превышает пороговую величину $E_{\text{пор}} = E_{\text{пор}} S$. С учетом этого факта получим

$$\eta = \frac{\lambda_n}{\lambda_{1s}} \frac{\tau_\phi}{\tau_p} \left(1 - \frac{E_{\text{пор}}}{E_n} \right) = \frac{\lambda_n}{\lambda_{1s}} \frac{\tau_\phi}{\tau_p} \left(1 - \frac{I_{\text{пор}}}{I_n} \right). \quad (4)$$

Экспериментальная зависимость КПД ВКР-лазера от интенсивности накачки представлена на рис. 3. В максимуме КПД достигает $\sim 30\%$, и это соответствует приблизительно трехкратному превышению интенсивности накачки над пороговой величиной. Входящие в (4) константы для наших экспериментальных условий имеют следующие значения:

$L = 60$ см; $l = 20$ см; $v = 2,5 \cdot 10^{10}$ см/сек; $g = 0,83 \cdot 10^{-2}$ см/Мвт /6/; $K = 10^8$ /6/; $\lambda_n = 1,06$ мк; $\lambda_{1s} = 1,41$ мк; $\tau_\phi / \tau_p \approx 0,8 + 0,73$; отсюда $\eta = 35 + 40\%$, что удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением $\sim 30\%$, если учесть неточность в определении $I_{\text{пор}}$ и $I_n^{(\text{max})}$.

Нестационарность генерации влияет не только на КПД, но и на расходимость излучения ВКР-лазера. Чтобы сформировалась дифракционная диаграмма направленности, излучение должно пройти в резонаторе путь L , удовлетворяющий условию $d/L = \lambda_{1g}/d \cdot \pi$, где d - диаметр наименьшей диафрагмы, ограничивающий



Р и с. 3. Экспериментальная зависимость КПД (по энергии) ВКР-лазера на длинах волн первой и второй стоксовых компонент от интенсивности продольной неаксиальной (одномодовой) накачки; $\Delta\nu_n \leq 5 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹, $\tau_n \approx 20$ нсек.

излучение в резонаторе. На прохождение пути L требуется время

$$T = L/v = d^2/\lambda_{1g}v.$$

В нашем случае $d = 0,4$ см, и поэтому $T = 46$ нсек; т.е. более чем в два раза превосходит $\tau_n = 20$ нсек. Поэтому расходимость стоксова излучения $\theta = 3 \cdot 10^{-3}$ рад превосходит дифракционную расходимость $\theta^{(g)} = 1,22 \lambda_{1g}/d = 4,3 \cdot 10^{-4}$ рад.

Таким образом для получения максимального значения КПД необходимо выполнение условия стационарности генерации и однородности интенсивности возбуждающего излучения по поперечному сечению резонатора ВКР-лазера.

Поступила в редакцию
17 февраля 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. G. Nuth, N. V. Karlov, R. H. Pantell, H. E. Puthof. IEEE J. Quant. Electr., QE-2, 763 (1966).
2. В. В. Бочаров, М. Г. Гангардт, А. З. Грасюк, И. Г. Зубарев, Е. А. Юков. ЖЭТФ, 57, 1585 (1969).
3. В. Н. Луговой. ЖЭТФ, 56, 683 (1969).
4. А. З. Грасюк, В. Ф. Ефимков, И. Г. Зубарев, В. И. Мишин, В. Г. Смирнов. Письма в ЖЭТФ, 8, 474 (1968).
5. H. Takuma, D. A. Jennings. Appl. Phys. Lett., 4, 185 (1964).
6. J. B. Grun, A. K. McQuillan, B. P. Stoicheff. Phys. Rev., 180, 61 (1969)
7. А. Фокс, Т. Ли. Сб. "Лазеры", Из-во И.Л., Москва, 1963 г., стр. 325.