

# Простая аналитическая модель непрерывного многокаскадного ВКР-лазера на волоконном световоде

И.А.Буфетов, Е.М.Дианов

*Рассмотрена простая модель многокаскадного волоконного ВКР-лазера, в рамках которой получены аналитические выражения для его выходных характеристик. Показано, что эффективность ВКР-лазера в значительной степени определяется сосредоточенными оптическими потерями в резонаторе. Предложено оценивать качество волоконных световодов как активной среды многокаскадных волоконных ВКР-лазеров с помощью определения КПД модельной схемы лазера.*

**Ключевые слова:** ВКР-лазер, многокаскадное ВКР, волоконный световод.

За последние несколько лет впечатляющие успехи достигнуты в области создания многокаскадных ВКР-лазеров на волоконных световодах. При накачке таких лазеров излучением с длиной волны в области 1 мкм можно получить с высокой эффективностью (порядка 50 %) вынужденное излучение практически любой длины волны: от длины волны накачки до  $\sim 1700$  нм. С момента первой демонстрации [1] данных лазеров в 1994 г. они привлекают к себе большое внимание из-за своих уникальных качеств.

Одной из важнейших областей их применения являются световодные системы связи, где такие лазеры используются как источники накачки для волоконных эрбиевых и ВКР-усилителей. Поскольку положение полосы усиления ВКР-усилителя определяется длиной волны излучения накачки, то волоконные ВКР-лазеры могут стать основой для широкополосных систем связи со спектральным уплотнением каналов во всей области прозрачности волоконных световодов.

Эффективность преобразователя (или конвертора) частоты, в роли которого фактически выступает многокаскадный волоконный ВКР-лазер, является одним из важнейших его параметров. Она зависит от большого числа параметров, характеризующих как сам световод, выполняющий роль ВКР-активной среды, так и другие элементы лазера, включая источник накачки. Так, применение в качестве ВКР-активной среды германо-силикатных световодов, хорошо освоенных промышленностью, ограничивает стоксов сдвиг частоты излучения в каждом каскаде ВКР-лазера значением  $\sim 400$  см<sup>-1</sup>. Для оптической связи необходимо реализовать сдвиги частоты порядка 1300–3000 см<sup>-1</sup>. Так, для оптических ВКР-усилителей на  $\lambda = 1300$  нм необходимо излучение накачки с  $\lambda \approx 1240$  нм. Еще большая длина волны накачки требуется для ВКР-усилителей в диапазоне 1400–1650 нм, а также для эрбиевых волоконных усилителей. В связи с этим при необходимости получить большой сдвиг

частоты излучения на германо-силикатном световоде необходимо использовать многокаскадный ВКР-лазер (от 3 до 6 каскадов), эффективность преобразования в котором падает с увеличением числа каскадов.

В работе [2] была продемонстрирована возможность использования фосфоросиликатного световода в качестве ВКР-активной среды для одно- и двухкаскадного лазера. Спектр ВКР в фосфоросиликатном световоде имеет узкую полосу с большим стоксовым сдвигом около 1300 см<sup>-1</sup>, что в три раза больше, чем стоксов сдвиг в германо-силикатном световоде. Это позволяет в соответствующее число раз снизить необходимое число каскадов ВКР-преобразования. Но оптические потери в фосфоросиликатных световодах в среднем (при настоящем уровне технологии) несколько выше, чем в германо-силикатных. Поэтому для определения наиболее эффективной конфигурации ВКР-лазера в каждом конкретном случае необходимо провести моделирование процесса генерации.

Математически процесс генерации  $N$ -каскадного волоконного ВКР-лазера описывается системой из  $2(N + 1)$  обыкновенных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями на зеркалах. В целом ряде работ (см., напр., [3, 4]) представлены результаты численного анализа некоторых разновидностей лазеров такого типа. Однако из-за большого числа параметров, влияющих на работу лазера, численные методы, как правило, не дают ясного представления о путях совершенствования конструкции. В частности, до настоящего времени в литературе отсутствует ответ на вопрос о сравнительной эффективности трехкаскадного ВКР-лазера на стандартном германо-силикатном световоде и дающего такой же сдвиг частоты однокаскадного лазера на фосфоросиликатном световоде (при достигнутом на данный момент уровне оптических потерь в фосфоросиликатных световодах).

В связи с этим для прогнозирования выходных характеристик рассматриваемых лазеров было бы желательно иметь решение задачи в аналитическом виде. Однако в общем виде получить такое решение, по-видимому, невозможно. Это обуславливает интерес к выбору модельной задачи, которая, с одной стороны, максимально со-

ответствовала бы реальной физической ситуации, а с другой – допускала бы аналитическое решение.

### 1. Выбор модели

Для определенности будем рассматривать линейную конструкцию каскадного ВКР-лазера. Трехкаскадный вариант этой конструкции представлен на рис.1.

Подобная конструкция исследовалась в большом числе работ (см., напр., [1–4]). Основой многокаскадного ВКР-лазера является отрезок волоконного световода, имеющий коэффициенты рамановского усиления  $g_i$  ( $i = 0, \dots, N - 1$ , где  $N$  – число каскадов ВКР-лазера) на длинах волн  $\lambda_{i+1}$  при накачке на длине волны  $\lambda_i$ . Световод находится внутри системы  $N$  вложенных оптических резонаторов, образованных таким же числом пар брэгговских решеток показателя преломления, записанных в сердцевине световода и выполняющих роль зеркал.

Накачкой для первого каскада ВКР-лазера, которому соответствует пара брэгговских решеток с отражением на длине волны  $\lambda_1$ , служит одномодовое излучение внешнего лазера (обычно волоконного лазера на ионах неодима или иттербия) с длиной волны  $\lambda_0$ . Накачкой для каждого следующего каскада является излучение предыдущего каскада. Коэффициенты отражения всех брэгговских решеток близки к 100 %, кроме одной из решеток на длину волны  $\lambda_N$  (на рис.1 такая решетка обозначена OR), коэффициент пропускания которой должен быть выбран оптимальным для получения максимальной выходной мощности.

Кроме того, в схему лазера включена одна дополнительная брэгговская решетка на длину волны  $\lambda_0$ , возвращающая назад излучение накачки. Брэгговские решетки могут быть записаны как непосредственно на активном световоде, так и на отрезках специального световода, которые затем свариваются с активным световодом. Оптические потери на каждой из длин волн характеризуются своим распределенным коэффициентом поглощения  $\alpha_i$ .

Если  $z$  – координата вдоль оси световода ( $0 \leq z \leq L$ , где  $L$  – длина световода, пары брэгговских зеркал всех резонаторов расположены в точках  $z = 0$  и  $z = L$ ), то при работе многокаскадного ВКР-лазера в непрерывном режиме генерация стоксовых компонент в световоде описывается хорошо известной системой уравнений (см., например, [5, 6]):

$$\begin{aligned} \frac{dP_0^\pm(z)}{dz} &= \mp [k_0 g_0 (P_1^+ + P_1^-) P_0^\pm + \alpha_0 P_0^\pm], \\ \frac{dP_i^\pm(z)}{dz} &= \pm [g_{i-1} (P_{i-1}^+ + P_{i-1}^-) P_i^\pm - k_i g_i (P_{i+1}^+ + P_{i+1}^-) P_i^\pm - \alpha_i P_i^\pm], \quad 0 < i < N, \\ \frac{dP_N^\pm(z)}{dz} &= \pm [g_{N-1} (P_{N-1}^+ + P_{N-1}^-) P_N^\pm - \alpha_N P_N^\pm]. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $P_i^\pm(z)$  – мощность излучения на длине волны  $\lambda_i$ , распространяющегося в положительном (+) и отрицательном (–) направлениях оси  $z$  ( $0 < i < N$ );  $P_0^\pm$  – мощность излучения накачки;  $k_i = \lambda_{i+1}/\lambda_i$  ( $0 \leq i < N$ ).

Система уравнений (1) дополняется граничными условиями, определяющими ввод излучения накачки, отра-



Рис.1. Схема трехкаскадного ВКР-лазера: HR (OR) – брэгговские решетки показателя преломления с высоким (оптимальным) коэффициентом отражения на указанных длинах волн; • – точки сварки световодов.

жение излучения на брэгговских решетках и вывод излучения последней стоксовой компоненты из резонатора, а также потери излучения, локализованные в точках (например, потери в точках сварки разнородных световодов, потери на брэгговских решетках и т. п.).

Отметим, что приведенная выше система уравнений не учитывает никаких других нелинейных явлений, кроме вынужденной генерации стоксовых компонент. Многочисленные экспериментальные работы различных авторов по непрерывным ВКР-лазерам (см., напр., [7] и ссылки в ней) подтверждают справедливость такого упрощения.

Результат численного решения системы уравнений (1) для трехкаскадного лазера на стандартном германосиликатном световоде со смещенной дисперсией приведен на рис.2. Лазер накачивался излучением с  $\lambda = 1.06$  мкм и давал выходное излучение с  $\lambda = 1.234$  мкм. Решение подобной задачи для шести каскадов преобразования приведено в [4].

Обращает на себя внимание тот факт, что мощности излучения промежуточных стоксовых компонент, распространяющихся в резонаторе в противоположных направлениях, мало отличаются друг от друга и в некотором приближении их можно считать просто постоянными, не зависящими от  $z$ . Ярко выраженная зависимость от  $z$  наблюдается только для мощности накачки  $P_0^\pm$  и мощности последней стоксовой компоненты  $P_N^\pm$ , что связано с вводом накачки в резонатор и выводом излучения из него. Если сделать обычное при рассмотрении процессов генерации в твердотельных (не волоконных) лазерах предположение о равномерном по длине резонатора вводе излучения накачки и равномерном распределении всех потерь в резонаторах (см., напр., [8]), то в

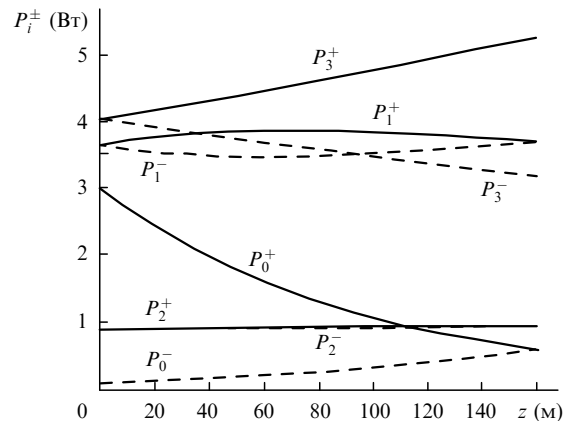


Рис.2. Зависимости от координаты  $z$  мощностей накачки и стоксовых компонент, распространяющихся внутри резонатора трехкаскадного ВКР-лазера на германосиликатном световоде со смещенной дисперсией. Мощность накачки на входе в световод 3 Вт, длина световода 160 м, коэффициент рамановского усиления световода  $g_0 = 5.2$  дБ/(км·Вт), выходная мощность лазера  $P_{out} = P_3^+ - P_3^-$ .

уравнениях (1) исчезает зависимость от  $z$  и аппроксимация мощностей распространяющихся волн в многокаскадном ВКР-лазере постоянными величинами становится точным решением приближенной системы уравнений.

В настоящей работе рассмотрено такое приближение применительно к многокаскадному волоконному ВКР-лазеру. В рамках данного приближения предполагается, что мощности всех волн, распространяющихся по световоду, не зависят от  $z$ , а все потери излучения в световоде рассматриваются как равномерно распределенные по длине световода и описываются коэффициентами потерь  $A_i$ .

Необходимо отметить, что потери в резонаторах ВКР-лазера можно разделить на три вида. Во-первых, это оптические потери в световоде (распределенные потери), которые пропорциональны длине световода и характеризуются коэффициентами  $\alpha_i$ . Во-вторых, это оптические потери, связанные с элементами конструкции резонатора (сосредоточенные потери). Сюда относятся, например, потери в точках сварки световодов в резонаторах, потери из-за несовершенства брэгговских зеркал. Эти потери не зависят от длины резонатора и определяются только технологией изготовления элементов. Таким образом, соответствующий усредненный по пути обхода резонатора коэффициент потерь может быть записан как  $\gamma/2L$ .

Параметр  $\gamma$  определяется следующим образом:  $\gamma = |\ln T|$ , где  $T = \prod_n T_n$  – суммарный коэффициент пропускания, учитывающий только сосредоточенные потери в резонаторе;  $T_n$  – коэффициент «пропускания»  $n$ -й точки световода (точнее,  $n$ -го короткого отрезка) с сосредоточенными потерями. Каждое  $T_n$  входит в произведение столько раз, сколько раз соответствующий элемент конструкции лазера проходит излучением при круговом обходе резонатора. Например, потери в каждой точке сварки световодов (см. рис.1) будут входить в произведение дважды. Для простоты будем считать, что  $\gamma$  не зависит от длины волны излучения.

Наконец, третий вид потерь – полезные потери, связанные с выводом излучения  $N$ -й стоксовой компоненты из последнего резонатора. Как известно, распределенные потери  $\alpha_R = |\ln R(2L)^{-1}|$ , где  $R$  – коэффициент отражения выходного зеркала. При моделировании  $\alpha_R$  должно выбираться в зависимости от других параметров задачи таким образом, чтобы КПД лазера был максимальным.

В рамках рассматриваемого приближения предполагается также, что излучение накачки вводится равномерно по длине резонатора, а не через торец световода и что высокоотражающие зеркала (брэгговские решетки) на длину волны накачки расположены на обоих концах световода, а не на одном, как показано на рис. 1.

В этих условиях излучение накачки распространяется по световоду в виде двух встречных волн с мощностями  $P_0^+$  и  $P_0^-$ . Оно поглощается в резонаторе или преобразуется в излучение первой стоксовой компоненты. При полной мощности вводимого в световод излучения накачки  $P_{p0}$  на единицу длины приходится мощность  $P_{p0}/2L$ .

Тогда система  $2(N+1)$  дифференциальных уравнений (1) из-за равенства нулю всех производных и очевидных в данном случае соотношений  $P_i^+ = P_i^- = P_i$  упрощается до системы  $N+1$  алгебраических уравнений:

$$\frac{P_{p0}}{2L} = 2k_0g_0P_0P_1 + A_0P_0,$$

$$2g_{i-1}P_{i-1} - 2k_i g_{i+1}P_{i+1} - A_i = 0, \quad 0 < i < N, \quad (2)$$

$$2g_{N-1}P_{N-1} - A_N = 0,$$

где  $A_i = \alpha_i + \gamma/2L$  ( $0 \leq i < N$ );  $A_N = \alpha_N + \gamma/2L + \alpha_R$ . В такой постановке задачи каждому набору параметров  $P_{p0}$ ,  $L$  и  $\alpha_R$  соответствуют своя мощность  $P_i^\pm$  (которая может быть легко получена в аналитической форме) и свой КПД лазера. Определяя далее оптимальные  $\alpha_R$  и  $L$ , соответствующие максимально возможному КПД лазера при заданных распределенных и сосредоточенных потерях в резонаторе, можно получить выражения для максимально возможного КПД. Отметим, что все коэффициенты в системе (2) могут быть измерены экспериментально.

Для однокаскадного ВКР-лазера из (1) для максимального КПД следует простое выражение:

$$\eta_1 = \frac{1}{k_0} \left\{ 1 - \left[ \frac{\gamma}{P_{p0}} \left\langle \left[ \left( \frac{\alpha_0}{g_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{\alpha_1}{g_0} \right)^{1/2} \right]^2 \right\rangle \right]^{1/2} \right\}^2. \quad (3)$$

Максимальный КПД достигается при оптимальной длине световода

$$L_{opt1} = \frac{\gamma}{2(\alpha_0\alpha_1)^{1/2}}.$$

Для двухкаскадного ВКР-лазера аналогичные соотношения выглядят так:

$$\eta_2 = \frac{1}{k_0k_1} \left\{ 1 - \left[ \frac{\gamma}{P_{p0}} \left\langle \left[ \left( \frac{\alpha_1(k_0g_0 + g_1)}{g_0g_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_0\alpha_2g_0 + \alpha_0g_1}{g_0g_1} \right)^{1/2} \right]^2 \right\rangle \right]^{1/2} \right\}^2, \quad (4)$$

$$L_{opt2} = \frac{\gamma}{2} \left( \frac{k_0g_0 + g_1}{k_0g_0\alpha_1\alpha_2 + \alpha_0\alpha_1g_1} \right)^{1/2}.$$

Существенно сложнее получаются соотношения для трехкаскадного лазера:

$$\eta_3 = \frac{1}{k_0k_1k_2} \left\{ 1 - \left[ \frac{\gamma}{P_{p0}} \left\langle \frac{(k_0g_0\alpha_2 + g_1\alpha_0)(k_1g_1\alpha_3 + g_2\alpha_1)}{g_0g_1g_2} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \left[ \left( \frac{k_0g_0 + g_1}{k_0g_0\alpha_2 + g_1\alpha_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_1g_1 + g_2}{k_1g_1\alpha_3 + g_2\alpha_1} \right)^{1/2} \right]^2 \right\rangle \right]^{1/2} \right\}^2, \quad (5)$$

$$L_{opt3} = \frac{\gamma}{2} \left[ \frac{(k_0g_0 + g_1)(k_1g_1 + g_2)}{(k_0g_0\alpha_2 + g_1\alpha_0)(k_1g_1\alpha_3 + g_2\alpha_1)} \right]^{1/2}.$$

Для ВКР-лазеров с большим числом каскадов получаются слишком громоздкие выражения, но при необходимости их также можно использовать.

## 2. Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов. КПД лазеров во всех случаях определяется сосредоточенными потерями в резонаторах  $\gamma$ , характеризующими конструкцию резонатора, распределенными потерями в световоде  $\alpha_i$  и коэффициентами рамановского усиления световода  $g_i$ , причем  $\alpha_i$  и  $g_i$  суть только характеристики используемого волоконного световода.

Величины  $\alpha_i$  и  $g_i$  входят в выражения для КПД только в виде отношения  $\alpha/g$ , которое имеет размерность мощности. Если в задаче имеется несколько коэффициентов рамановского усиления и типов характерных распределенных потерь, то в конечное выражение входит некоторая комбинация отношений типа  $\alpha/g$ . В формулах (3), (4) и (5) для КПД можно выделить взятый в угловые скобки множитель  $\langle P \rangle$ , содержащий всю информацию об используемом световоде и имеющий размерность мощности. Для однокаскадного лазера имеем

$$\langle P \rangle = \left[ \left( \frac{\alpha_0}{g_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{\alpha_1}{g_0} \right)^{1/2} \right]^2,$$

для двухкаскадного –

$$\langle P \rangle = \left\{ \left[ \frac{\alpha_1(k_0g_0 + g_1)}{g_0g_1} \right]^{1/2} + \left[ \frac{k_0\alpha_2g_0 + \alpha_0g_1}{g_0g_1} \right]^{1/2} \right\}^2$$

и для трехкаскадного –

$$\langle P \rangle = \frac{(k_0g_0\alpha_2 + g_1\alpha_0)(k_1g_1\alpha_3 + g_2\alpha_1)}{g_0g_1g_2} \times \left[ \left( \frac{k_0g_0 + g_1}{k_0g_0\alpha_2 + g_1\alpha_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_1g_1 + g_2}{k_1g_1\alpha_3 + g_2\alpha_1} \right)^{1/2} \right]^2.$$

Выражение для квантового КПД многокаскадного лазера может быть записано в виде

$$\eta_q = \left[ 1 - \left( \frac{\gamma}{P_{p0}} \langle P \rangle \right)^{1/2} \right]^2. \tag{6}$$

Параметр  $\langle P \rangle$  – характеристика только световода, выполняющего роль ВКР-активной среды. Эффективность каскадного лазера существенно зависит от оптических потерь в резонаторах, причем важную роль играют сосредоточенные потери в резонаторах. Если в оптической схеме лазера отсутствуют (точнее, очень малы) сосредоточенные оптические потери, то КПД лазера может становиться большим (в пределе квантовая эффективность приближается к единице).

Возникает вопрос об отношении предложенной модели к реальным лазерным схемам. Сравним результаты расчета по этой модели с реальными характеристиками однокаскадного ВКР-лазера (1.06 мкм  $\rightarrow$  1.23 мкм) на фосфоросиликатном световоде, рассмотренного в работе [9]. На рис.3 представлены зависимости выходной мощности этого лазера от длины световода, рассчитанные по нашей модели (штриховые кривые) и полученные в результате численного решения системы уравнений (1) (сплошные кривые), а также экспериментально полученная выходная мощность при определенной длине световода. Результаты численного решения и расчетов по простой модели хорошо согласуются при больших длинах световода и хуже – при малых. Данное обстоятельство соответствует тому факту, что в модели не учитываются потери излучения накачки после двойного прохода по активному световоду (излучение накачки, не поглощенное за один двойной проход по световоду, уходит из системы).

Количественное и, безусловно, качественное соответствие между реальным лазером и простой моделью позволяет использовать аналитические выражения модели для оценки реальных лазерных систем. Например, мож-

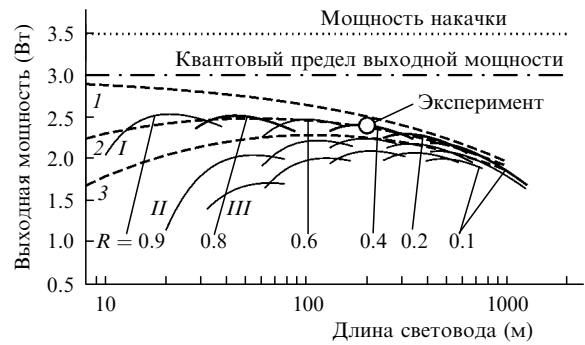


Рис.3. Рассчитанные по предложенной модели (штриховые кривые) и полученные в результате численного решения системы уравнений (1) (сплошные кривые) зависимости выходной мощности ВКР-лазера ( $\lambda_1 = 1.23$  мкм,  $\lambda_0 = 1.06$  мкм,  $P_{p0} = 3.5$  Вт) на фосфоросиликатном световоде от длины световода при разных коэффициентах отражения выходной брэгговской решетки  $R$  и сосредоточенных потерях в резонаторе  $\gamma = 0$  (I и группа кривых I), 0.2 (2 и II) и 0.4 дБ (3 и III).

но сравнивать эффективности различных световодов как ВКР-активных сред в том случае, если они характеризуются различными потерями и коэффициентами усиления. В частности, используя выражение (3), можно сравнивать КПД однокаскадных лазеров на различных световодах, отдавая предпочтение световодам с максимальным КПД и полагая, что такие световоды будут обеспечивать более высокий КПД и в реальных лазерных схемах.

В качестве примера на рис.4 представлены зависимости квантового КПД  $\eta_q$  от  $\alpha_0/g_0$  и  $\alpha_1/g_0$ , рассчитанные по выражению (3), для определенной мощности накачки  $P_{p0} = 3.5$  Вт и определенных сосредоточенных потерь в резонаторе  $\gamma = 0.4$  дБ. Аналогично можно использовать выражения (4) и (5) для сравнения эффективности световодов в двух- и трехкаскадных лазерах.

Наконец, используя выражения для однокаскадного лазера на фосфоросиликатном световоде (3) и трехкаскадного лазера на германосиликатном световоде (5), можно сравнить эффективности этих лазеров при преобразовании длин волн 1.06 мкм  $\rightarrow$  1.24 мкм. Для трехкаскадного лазера на германосиликатном DSF световоде параметр  $\langle P \rangle = 1.58$  Вт, а для однокаскадного лазера на фосфоросиликатном световоде – всего 0.88 Вт. Иными словами, несмотря на более высокие потери в фосфоросиликатном световоде при современном уровне технологии ( $\alpha_0 = 1.45$  дБ/км,  $\alpha_1 = 0.92$  дБ/км,  $g_0 = 5.3$  дБ/(км·Вт)) снижение числа каскадов преобразования существенно сказывается на общей эффективности лазера: при  $\gamma = 0.4$

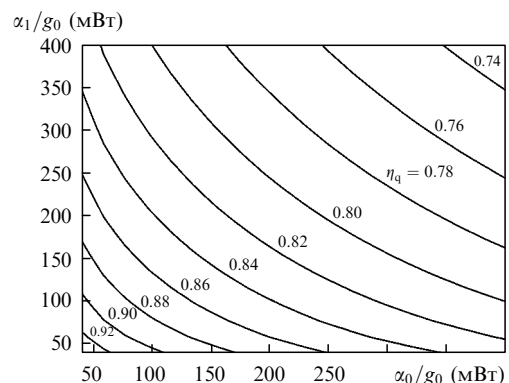


Рис.4. Зависимости квантового КПД  $\eta_q$  модельного однокаскадного ВКР-лазера от параметров  $\alpha_0/g_0$  и  $\alpha_1/g_0$  при  $P_{p0} = 3.5$  Вт и  $\gamma = 0.4$  дБ.

дБ и  $P_{p0} = 3.5$  Вт максимальный КПД лазера на фосфоросиликатном световоде составляет 61 %, в то время как на германосиликатном – только 46 %.

## Заключение

Предложена простая модель многокаскадного ВКР-лазера, позволившая получить аналитические выражения для описания его работы. Установлены факторы, определяющие КПД многокаскадных ВКР-лазеров. Одним из основных таких факторов являются сосредоточенные оптические потери в резонаторе лазера. Результаты расчетов по предложенной модели позволяют легко сравнивать различные световоды по их эффективности в качестве ВКР-активных сред. При использовании световодов с разными стоксовыми сдвигами возможно сравнение ВКР-лазеров с разным числом каскадов, реализующих одинаковый суммарный сдвиг частоты излучения.

Работа была частично поддержана РФФИ (грант № 99-02-17843).

1. Grubb S.G., Erdogan T., Mizrahi V., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemmaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolak G., Beker P.C., Peckham D.W. *Proc. Conf. Opt. Ampl. Appl.* (Breckenridge, PD-3, 1994).
2. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov

O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semjonov S.L., Prokhorov A.M. *Electron. Letts*, **33**, 1542 (1997).

3. Reed W.A., Coughran W.C., Grubb S.G. *Proc. Top. Meet. OFC'95* (San Diego, 1995, p.107).
4. Vareille G., Audouin O., Desurvire E. *Electron. Letts*, **34**, 675 (1998).
5. Auyeung J., Yariv A. *J. Opt. Soc. Amer.*, **69**, 803 (1979).
6. Stolen R.H. *Fiber and Integrated Optics*, **3**, 21 (1980).
7. Dianov E.M., Bufetov I.A., Karpov V.I., Bubnov M.M., Gurjanov A.N., Khopin V.F. In: *Optical Networking* (Ldn, Springer, p.165).
8. Звелто О. *Принципы лазеров* (М., Мир, 1990).
9. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M., Grekov M.V., Shubin A.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Semjonov S.L., Guryanov A.N., Khopin V.F. *Techn. Digest ECOC'99* (Nice, France, paper Mo B2.2, 1999); Дианов Е.М., Буфетов И.А., Бубнов М.М., Греков М.В., Шубин А.В., Васильев С.А., Медведков О.И., Семенов С.Л., Егорова О.Н., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В., Варелас Д., Иокко А., Костантини Д., Лимбергер Н.Г., Салатэ Р.-П. *Квантовая электроника*, **29**, 97 (1999).

### I.A.Bufetov, E.M.Dianov. A simple analytic model for a cw multistage Raman fibre laser.

Using a simple model of a multistage fibre Raman laser, analytical expressions for its output characteristics are derived. The efficiency of the Raman laser is shown to be determined in a considerable extent by the lumped optical loss of the cavity. A proposal is made to estimate the quality of optical fibres as an active medium for multistage fibre Raman lasers from the efficiency of a model Raman laser based on the fibres under study.