

# Эффективная генерация суммарной частоты и вторых гармоник излучения с помощью системы лазер на парах меди – двухпроходный усилитель

В.М.Батенин, В.Т.Карпухин, М.М.Маликов

*Приведены новые результаты по эффективной генерации УФ излучения с использованием нелинейных кристаллов DKDP, ВВО и двухпроходного лазерного усилителя на парах меди с повышенной пиковой мощностью. При генерации суммарной частоты ( $\lambda = 0.271$  мкм) получены средние мощности (средние оптические КПД) 3.6 Вт (24 %) для ВВО и 2.1 Вт (14 %) для DKDP. При генерации вторых гармоник с использованием ВВО наилучшие средние мощности составляли 3.4 Вт (44 %) для  $\lambda = 0.289$  мкм и 2.1 Вт (27 %) для  $\lambda = 0.255$  мкм.*

**Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, нелинейный кристалл, многопроходный усилитель, лазер на парах меди.

## 1. Введение

Применение лазеров и лазерных усилителей на парах меди для нелинейной генерации УФ излучения представляет большой практический интерес. Однако конкурировать с лазерами других типов, например твердотельными [1, 2], они смогут, по всей вероятности, при мощностях УФ излучения более 5–10 Вт, а также при достаточно низкой стоимости одного ватта излучения. Для этого можно использовать сравнительно дешёвые лазерные системы на парах меди с отпаянными активными элементами [3, 4], позволяющие получать мощность излучения 10–25 Вт. Достижению высоких КПД нелинейного преобразования и большой эффективности системы в целом препятствует ряд физических причин, связанных как с особенностями лазерных систем на парах меди, так и со свойствами нелинейных кристаллов.

Лазер на парах меди (ЛПМ) генерирует на двух длинах волн –  $\lambda = 0.51$  и  $0.578$  мкм, что позволяет, используя такие нелинейные кристаллы, как DKDP, ВВО, CLVO и др., осуществлять генерацию вторых гармоник (ГВГ) соответственно на  $\lambda = 0.255$  и  $0.289$  мкм, а также генерацию суммарной частоты (ГСЧ) на  $\lambda = 0.271$  мкм.

К сожалению, выходное излучение обычно применяемых ЛПМ с неустойчивым резонатором состоит из нескольких пучков, образующихся при последовательных проходах затравочного спонтанного излучения в оптическом резонаторе за короткое время существования инверсии [5–7]. Эти пучки имеют разную расходимость, что затрудняет их совместное использование для нелинейного преобразования частоты [8]. Пучок, образующийся после последнего прохода излучения в резонаторе, может иметь малую дифракционную расходимость, однако в нём сосредоточена небольшая доля энергии лазерного излучения [2–10]. Поскольку оптический КПД пре-

образования частоты лазерного излучения с помощью нелинейных кристаллов существенно зависит от плотности мощности излучения и расходимости пучка в кристалле [11], то эффективно могут использоваться только пучки, выходящие из резонатора с расходимостью, близкой к дифракционной.

Обычно пучки с большой расходимостью «улучшают» с помощью пространственного фильтра и определяют оптический КПД нелинейного преобразования по отношению к оставшейся части излучения лазера, поступающей на вход кристалла. В этом случае для ЛПМ с неустойчивым резонатором средние мощности УФ излучения при использовании кристаллов ADP [12] и ВВО [13] составляли 5.5 и 230 мВт соответственно, а оптические КПД не превышали 8%–9%. В работах [12, 13] пучок круглого сечения фокусировался в нелинейный кристалл сферическими линзами. В последующих работах (см., напр., обзор [14]) был достигнут значительный прогресс за счет увеличения доли мощности излучения ЛПМ с малой расходимостью и применения цилиндрических линз для фокусировки излучения в кристалл. Так, например, в [15] при полной мощности ЛПМ 20 Вт на кристалле ВВО получена мощность излучения 1.75 Вт и КПД 34% ( $\lambda = 0.255$  мкм), 1.22 Вт и 29% ( $0.289$  мкм), 1.5 Вт и 19% ( $0.271$  мкм).

В работе [16] вместо цилиндрических линз использовались сферические вогнутые зеркала, установленные под углом  $45^\circ$ ; при этом на ВВО для ГВГ ( $\lambda = 0.255$  мкм) получены максимальная мощность 1.4 Вт и КПД 28%. На кристалле DKDP для ГСЧ в [10] реализована мощность 0.75 Вт при КПД 12% с использованием оптимизированной сферической оптики, создававшей в кристалле параллельный пучок круглого сечения.

В случае применения более мощных (50–90 Вт) ЛПМ с неустойчивым резонатором мощности ГВГ ( $\lambda = 0.255$  мкм) заметно возросли, но оптические КПД остались прежними. Так, наилучшие результаты были следующими: 3.9 Вт (КПД 29%) на кристалле ВВО и 4.7 Вт (КПД 35%) на кристалле CLVO [17]. В работе [18] сообщается о ГВГ в зелёной части спектра на одном кристалле ВВО (3.2 Вт, 20%) и на двух кристаллах ВВО (5.13 Вт, 16%). Отметим, что в работах [17, 18] на вход кри-

В.М.Батенин, В.Т.Карпухин, М.М.Маликов. Институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, Ижорская ул., 13/19; e-mail: mmalikov@oivtran.ittp.ru

Поступила в редакцию 30 декабря 2004 г., после доработки – 20 июня 2005 г.

сталлов подавалась только часть (от 0.2 до 0.5) полной мощности ЛПМ, которая могла быть эффективно преобразована в УФ излучение.

Более полного преобразования всей энергии лазерного излучения можно достичь, используя схему задающий генератор – усилитель на парах меди, поскольку в этом случае почти вся выходная мощность может быть сосредоточена в пучке с дифракционной расходимостью. При мощности излучения на выходе усилителя до 20 Вт на кристалле KDP получены мощность и КПД соответственно  $\sim 1$  Вт и  $\sim 5\%$  ( $\lambda = 0.271$  мкм) [19], а при мощности усилителя 4.5 Вт на кристалле ВВО – 0.59 Вт и 25% (0.255 мкм), 0.53 Вт и 27% (0.289 мкм), 0.56 Вт и 14% (0.271 мкм) [20]. В работе [21] при использовании более мощного усилителя ( $\sim 40$  Вт) и кристалла ВВО достигнуты следующие результаты: 3.6 Вт и 20% (0.255 мкм), 2.0 Вт и 22% (0.289 мкм), 3.8 Вт и 14% (0.271 мкм). Максимальные мощности ГВГ (0.255 мкм) на кристалле ВВО (9 Вт (КПД 8%) [22]) и на кристалле CLBO (15 Вт (КПД 28%) [23]) реализованы для усилителей с выходной мощностью соответственно 113 и 102 Вт. В этих работах для ГВГ на входе в кристалл использовалась примерно половина полной мощности усилителей, а для ГСЧ – почти вся их мощность.

Исследования показали, что с увеличением полной мощности излучения лазерных систем на атомах меди мощность преобразованного УФ излучения нарастает, но средний оптический КПД остается равным  $\sim 30\%$ . Авторы работ [14–19] считают, что наблюдаемое ограничение оптических КПД для большинства кристаллов (кроме CLBO) связано с поглощением в них УФ излучения, вследствие чего происходит неоднородный нагрев кристалла (возникает так называемое тепловое самовоздействие [11]). Очевидно, что кроме теплового самовоздействия оптический КПД мог ограничиваться большой расходимостью пучка (даже дифракционной) в главной плоскости кристалла, если она была больше или соизмерима с угловой шириной синхронизма нелинейного кристалла.

Для увеличения эффективности генерации УФ излучения при использовании лазеров с небольшой мощностью в [24] была предложена схема генератор – многопроходный усилитель – нелинейный кристалл. При особой конструкции многопроходного усилителя [25] существенно возрастает пиковая мощность его импульсов излучения при сохранении средней мощности на прежнем уровне. Это позволяет увеличивать КПД преобразования в нелинейном кристалле за счет повышения пиковой плотности мощности входящего в кристалл излучения, не прибегая к чрезмерному уменьшению диаметра пучка (или линейного размера пучка в главной плоскости кристалла), которое отрицательно сказывается на его расходимости и соответственно на эффективности генерации гармоник. Такая схема впервые была экспериментально реализована в [26, 27].

В настоящей работе использовалась усовершенствованная схема двухпроходного усилителя [28] с максимальной пиковой мощностью 300 кВт и средней мощностью до 25 Вт. С помощью цилиндрических линз на входе в нелинейный кристалл создавался плоский пучок прямоугольного сечения в фокальной плоскости с малой расходимостью в главной плоскости кристалла. Для сравнения проводились эксперименты и с параллельным пучком круглого сечения.

## 2. Описание эксперимента

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1. Конструкция и параметры усилителя подробно описаны в [27, 28]. Система состояла из задающего генератора 1 поляризационного разветвителя 2, усилительного каскада 3, блока возврата пучка 4, включающего в себя четвертьволновую фазовращающую пластинку 5 и плоское зеркало 6. Усилительный каскад, выполненный на базе трубки ГЛ-201 с длиной рабочей камеры 80 см и диаметром 20 мм, излучал импульсы с  $\lambda = 0.51$  и 0.578 мкм и частотой следования 10 кГц. Пучок излучения задающего генератора  $J^+$  с горизонтальной (в плоскости рисунка) поляризацией электрического вектора входил в активную среду усилительного каскада 3 и поступал в блок возврата 4. Пучок  $J^-$ , идущий в обратном направлении, приобретал ортогональную поляризацию, поэтому он не интерферировал с пучком  $J^+$  и выводился из системы поляризационным разветвителем 2 в сторону поворотного зеркала 7, а затем направлялся в телескопический коллиматор 8, состоящий из сферических линз. Для уменьшения потерь лазерного излучения и оптических aberrаций при двукратном прохождении пучка оптические окна трубки усилителя просветлялись, а в качестве поляризационного разветвителя 2 использовался специальный призматический жидкокристаллический поляризатор, разработанный и изготовленный авторами [29] для ЛПМ. Такой поляризатор обладает большим пропусканием – 0.985, высокими поляризационными качествами и большой лучевой стойкостью.

В первой серии экспериментов пучок после коллиматора 8 проходил через цилиндрическую линзу 9, которая сжимала его только по одной оси, перпендикулярной плоскости рисунка (главной плоскости кристалла). Центр перетяжки такого пучка располагался посередине кристалла 10. Сечение пучка вблизи перетяжки имело (приблизительно) форму прямоугольника шириной  $h \approx 5 - 9$  мм (рис. 1), равной диаметру пучка на выходе коллиматора 8. Величина  $h$  задавалась максимально большой и ограничивалась только поперечным размером кристалла. Это делалось для получения в главной плоскости кристалла (плоскости синхронизма) минимальной предельной дифракционной расходимости пучка, определяемой размером  $h$ .

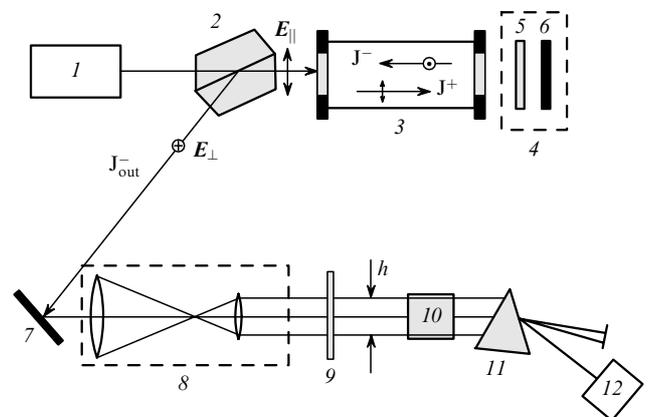


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – задающий генератор; 2 – поляризационный разветвитель; 3 – усилительный каскад; 4 – блок возврата пучка; 5 – фазовращающая пластинка  $\lambda/4$ ; 6 – плоское зеркало; 7 – поворотное зеркало; 8 – телескопический коллиматор; 9 – цилиндрическая линза; 10 – нелинейный кристалл; 11 – кварцевая призма; 12 – датчик измерителя мощности излучения.

Табл.1. Параметры нелинейных кристаллов и лазерного излучения.

Кристалл	Процесс	$\lambda$ (мкм)	$l$ (см)	$\theta$ (град)	$\Delta Q$ (мрад)	$h$ (мм)	$\varphi$ (мрад)	$\varphi_{cr}$ (мрад)
DKDP	ГСЧ	0.271	4	78.5	0.39	1.1–1.2*	2–4	1.3–2.6
						9	0.3–0.4	0.2–0.26
ВВО	ГСЧ	0.271	1	46.3	0.18	1.1–1.2*	2–4	1.3–2.6
						5.5	0.5–0.66	0.3–0.4
ВВО	ГВГ	0.255	1	50.7	0.18	1.1–1.2*	2–4	1.2–2.4
						5.5	0.5–0.66	0.3–0.4
ВВО	ГВГ	0.289	1	42.5	0.26	5.5	0.5–0.66	0.3–0.4

\*Диаметр лазерного пучка круглого сечения.

Во второй серии экспериментов с помощью телескопического коллиматора  $\delta$  диаметр пучка уменьшался до 1–1.2 мм и далее этот пучок (с круглым сечением) пропускаться непосредственно через нелинейный кристалл  $10$ .

Расходимость  $\varphi$  (полный угол) пучков с сечениями круглой и прямоугольной формы измерялась методом калиброванных диафрагм в воздухе (в главной плоскости кристалла) и пересчитывалась в расходимость внутри кристаллов  $\varphi_{cr}$  с учётом закона преломления (табл.1).

В работе использовались кристаллы DKDP и ВВО. Кристалл DKDP диаметром 10 мм и длиной  $l = 4$  см с углом среза  $78.5^\circ$  предназначался для ГСЧ ( $\lambda = 0.271$  мкм) двух указанных линий усилителя. Кристалл ВВО с поперечным размером  $7 \times 7$  мм и длиной вдоль пучка излучения  $l = 10$  мм имел угол среза  $48^\circ$ , что позволяло путём перестройки по углу синхронизма осуществлять ГВГ зелёной линии (0.255 мкм), ГВГ жёлтой линии (0.289 мкм) и ГСЧ (0.271 мкм). Во всех перечисленных процессах использовался скалярный (оо–е) синхронизм.

Угол синхронизма  $\theta$  и угловая ширина синхронизма (при заданной длине кристалла  $l$ )  $\Delta Q$ , рассчитанные внутри кристаллов для условий нашего эксперимента, представлены в табл.1. Для расчёта этих параметров использовались данные о свойствах кристаллов из работ [30–32]. Температура кристаллов полагалась равной  $40^\circ\text{C}$ .

УФ излучение отделялось от лазерного остаточного излучения кварцевой призмой  $11$ . Средняя по периоду следования импульсов мощность УФ излучения  $W_{UV}$  измерялась калориметрическим прибором  $12$  и пересчитывалась к выходу из кристалла с учётом потерь на призме  $11$ . Этим же прибором измерялись средние мощности лазерного излучения на входе в кристалл: суммарная по длинам волн ( $W_{g+y}$ ), на жёлтой ( $W_y$ ) и зелёной ( $W_g$ ) линиях. С помощью широкополосного осциллографа и фотозлемента регистрировались соответствующие осциллограммы отдельных импульсов излучения  $U(t)$  на входе в кристалл и импульсов УФ излучения на выходе. Средний оптический КПД нелинейного преобразования определялся как  $\eta = (W_{UV}/W)$ , где в качестве  $W$  бралась одна из величин –  $W_{g+y}$ ,  $W_y$ ,  $W_g$ .

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В данной работе благодаря особой конструкции двухпроходного усилителя получено двукратное повышение пиковой мощности импульса выходного излучения по сравнению с однопроходным вариантом усилителя при одинаковых мощностях накачки рабочей среды усилительных каскадов (3.0–3.2 кВт) и равных средних выходных мощностях. В экспериментах использовались два ре-

жима работы усилителя. Первый – режим с максимальной пиковой мощностью от 300 до 210 кВт, средней мощностью 25–22 Вт и отношением  $W_y/W_g \approx 0.7$ . Во втором режиме пиковая мощность излучения на выходе усилителя составляла  $\sim 190$  кВт, средняя мощность – примерно 18.5 Вт, а отношение  $W_y/W_g \approx 1.0$ . С учётом потерь в оптических трактах величина  $W_{g+y}$  (на входе в кристалл) для различных экспериментов изменялась в пределах 13–17 Вт.

В табл.1 приведены измеренные значения расходимостей пучков  $\varphi$ , которые, конечно, зависели от диаметра пучка на выходе телескопического коллиматора  $\delta$  (рис.1). Отметим, что тщательной подстройкой телескопического коллиматора удавалось компенсировать влияние тепловой линзы усилительного каскада и получить минимальные расходимости, равные двум–трём дифракционным расходимостям, соответствующим размеру  $h$  или диаметру пучка круглого сечения. Различным фокусным расстояниям цилиндрических линз  $f_c$  отвечали разные плотности мощности лазерного излучения в кристалле.

На рис.2 представлены типичные осциллограммы импульсов излучения на входе в кристалл для первого и вто-

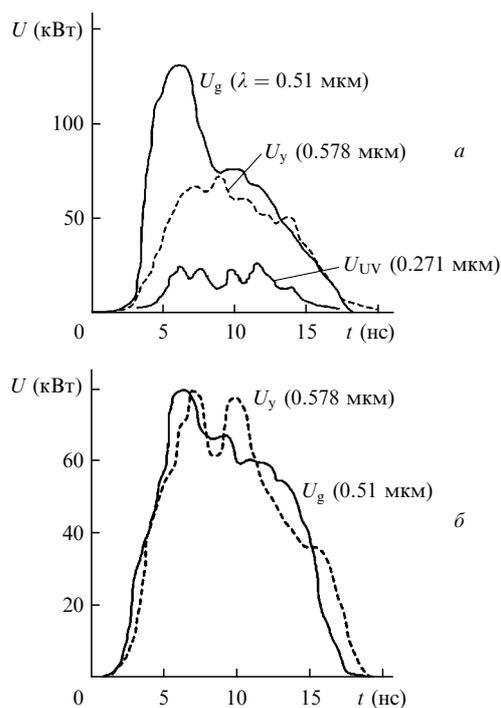


Рис.2. Осциллограммы импульсов излучения на входе в кристалл для первого режима работы усилителя и  $W_{g+y} = 16.8$  Вт (а) и для второго режима работы усилителя и  $W_{g+y} = 15.0$  Вт (б).

Табл.2. Параметры генерации УФ излучения при использовании на входе в кристалл пучка прямоугольного сечения с шириной  $h$  в главной плоскости кристалла (второй режим работы усилителя).

Кристалл	Процесс	$\lambda$ (мкм)	$W_{g+y}$ (Вт)	$W_y/W_g$	$U_g$ (кВт)	$U_y$ (кВт)	$h$ (мм)	$f_c$ (мм)	$W_{UV}$ (Вт)	$\eta$ (%)
DKDP	ГСЧ	0.271	14.6	0.9	80	72	9.0	400	2.1	14
DKDP	ГСЧ	0.271	15.4	0.9	80	72	9.0	150	1.54	10
VVO	ГСЧ	0.271	15.0	1.0	77.6	77.6	5.5	150	3.6	24
VVO	ГВГ	0.255	15.6	1.0	80	–	5.5	150	2.1	27
VVO	ГВГ	0.289	15.6	1.0	–	80	5.5	150	3.4	44

Табл.3. Параметры генерации УФ излучения при использовании на входе в кристалл параллельного пучка круглого сечения.

Кристалл	Процесс	$\lambda$ (мкм)	$W_{g+y}$ (Вт)	$W_y/W_g$	$U_g$ (кВт)	$U_y$ (кВт)	$W_{UV}$ (Вт)	$\eta$ (%)
DKDP	ГСЧ	0.271	16.8	0.8	130	70	1.8*	10.7
DKDP	ГСЧ	0.271	14.5	0.7	120	50	1.2	8
VVO	ГВГ	0.255	14.8	0.7	122	51	1.0	7
VVO	ГСЧ	0.271	13.0	0.7	110	45	0.7	5.4

\*Соответствует первому режиму работы усилителя (см. рис.2,а).

рого режимов работы усилителя. Видно большое различие соотношений пиковых мощностей отдельных импульсов излучения жёлтой ( $U_y$ ) и зелёной ( $U_g$ ) линий в первом и во втором режимах работы. Понятно, что второй режим более предпочтителен для ГСЧ.

Результаты генерации УФ излучения с использованием на входе в кристалл пучка прямоугольного сечения с шириной  $h$  и пучка круглого сечения приведены соответственно в табл.2 и 3.

Наилучшие результаты получены в случае пучка прямоугольного сечения для кристалла как VVO, так и DKDP. При полной мощности лазерной системы 18.5 Вт и мощностях на входе в кристалл VVO порядка 15 Вт достигнуты сравнительно высокие средние мощности и средние оптические КПД: 3.6 Вт и 24 % для ГСЧ, 3.4 Вт и 44 % для ГВГ жёлтой линии и 2.1 Вт и 27 % для ГВГ зелёной линии. На кристалле DKDP для ГСЧ получены мощность 2.1 Вт и КПД 14 %. Для пучка круглого сечения мощность УФ излучения и КПД не превышали 1.8 Вт и 11 % в случае ГСЧ на DKDP и составляли  $\sim 1$  Вт и 5 %–8 % для кристалла VVO.

Более высокие мощности УФ излучения и оптические КПД при использовании пучка со сравнительно большим размером  $h = 5.5 - 9$  мм можно объяснить примерно на порядок меньшей расходимостью  $\varphi_{cr}$  пучка прямоугольного сечения по сравнению с расходимостью пучка круглого сечения. Отметим, что для пучка круглого сечения с большой расходимостью и малым поперечным размером мощность излучения при ГСЧ заметно выше для кристалла DKDP (1.8 Вт), чем для VVO. Это связано со значительно большей угловой шириной синхронизма  $\Delta Q$  для DKDP, чем для VVO (см. табл.1).

Несмотря на то что расходимость  $\varphi_{cr}$  пучка прямоугольного сечения в этих экспериментах с кристаллом VVO была мала, она всё же превышала угловую ширину синхронизма  $\Delta Q$  (см. табл.1). Отношение  $\varphi_{cr}/\Delta Q$  составляло 1.2–2.2 (для пучка с круглым сечением такое отношение примерно на порядок больше). По-видимому, для повышения эффективности нелинейного преобразования необходимо довести расходимость пучка в кристалле до значений, меньших или равных  $\Delta Q$ , путём увеличения ширины пучка  $h$  и устранения различных оптических aberrаций.

Очевидно, что с ростом ширины пучка (и соответственно площади сечения) необходимо увеличивать и пи-

ковую мощность импульса излучения усилителя для поддержания достаточно высокой пиковой плотности мощности входящего в кристалл излучения, что и было сделано в данной работе.

#### 4. Выводы

Представленные результаты подтверждают возможность создания эффективных источников УФ излучения на базе лазерных многопроходных усилителей на парах меди с повышенной пиковой мощностью импульса излучения. При мощности излучения двухпроходного усилителя 20 Вт и применении нелинейных кристаллов DKDP и VVO получены мощности УФ излучения (ГВГ и ГСЧ) от 2.1 до 3.6 Вт. Ранее такие значения реализовывались в основном при использовании лазерных систем на парах меди мощностью свыше 40–50 Вт. Отметим, что в данной работе для ГВГ ( $\lambda = 0.289$  мкм) жёлтой линии излучения усилителя достигнут весьма высокий средний оптический КПД – 44 % и мощность 3.4 Вт.

Необходимо как техническая доработка системы многопроходного усилителя, так и дальнейшая оптимизация схемы формирования пучка в нелинейных кристаллах.

Авторы приносят благодарность Н.А.Лябину и А.Д.Чурсину за техническое содействие в создании экспериментального лазерного усилителя.

1. *Проект фирмы Photonics Industries International Inc.* (USA, DC-Series, Model DC-10-266, 2002).
2. *Проект фирмы LAS (Laser Analytic System)* (USA, Model Delta Train, 1999).
3. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Угольников С.А., Королёва М.Е., Казарян М.А. *Квантовая электроника*, **31**, 191 (2001).
4. Колоколов И.С., Клименко В.И., Лябин Н.А., Парамонова Г.М., Чурсин А.Д., Казарян М.А., Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. *Прикладная физика*, № 3, 84 (2003).
5. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Раутиан С.Г., Шальгин А.М. *Квантовая электроника*, **4**, 1325 (1977).
6. Carman R.J. *Opt. Commun.*, **119**, 415 (1995).
7. Coutts D.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 330 (1995).
8. Карпунин В.Т., Маликов М.М. *ЖТФ*, **70**, 87 (2000).
9. Беляев В.П., Зубов В.В., Исаев А.А., Лябин Н.А. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 74 (1985).
10. Карпунин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **25**, 809 (1998).
11. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Радио и связь, 1982).

12. Исаев А.А., Леммерман Г.Ю., Малафеева Г.Л. *Квантовая электроника*, **7**, 1700 (1980).
13. Zhang G., Lin F., Chen C., Wu B. *Acta Optica Sinica*, **4**, 513 (1984)
14. Piper J.A., in *Pulsed Metal Vapour Lasers. NATO ASI Series* (Dordrecht—London: Kluwer Acad. Publ., 1996, p. 277).
15. Coutts David.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 2208 (1995).
16. Градобоев Ю.Б., Гуляев Ю.В., Казарян М.А. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 1133 (2004).
17. Trickett Rodney I., Withford Michael J., Brown Daniel J.W. *Opt. Lett.*, **23**, 189 (1998).
18. Huot N., Jonin C., Sanner N., Baubeau E., Audouard E., Laporte P. *Opt. Commun.*, **211**, 277 (2002).
19. Полунин Ю.П., Троицкий В.О. *Квантовая электроника*, **14**, 2249 (1987).
20. Троицкий В.О. *Оптика атмосферы и океана*, **6**, 666 (1993).
21. Coutts D.W., Brown D.J.W., Piper J.A. *Techn. Dig. CLEO* (Washington D.C., Opt. Soc. Amer., 1993, paper CThN7).
22. Molander W.A. *Techn. Dig. Conf. on Laser and Electro-Optics* (Washington D.C., Opt. Soc. Amer., 1994, v. 8, paper CThM2).
23. Brown Daniel J.W., Withford Michael J. *Opt. Lett.*, **26**, 1885 (2001).
24. Карпухин В.Т., Маликов М.М. Свидетельство РФ на полезную модель № 22590. Заявка № 2001129954 от 08.11.01. *БИПМ*, № 10 (2002).
25. Карпухин В.Т., Маликов М.М. Свидетельство РФ на полезную модель № 19612. Заявка № 2001110644 от 24.04.01. *БИПМ*, № 25 (2002).
26. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Сборник тезисов докл. симп. «Лазеры на парах металлов и их применение»* (Ростов-на-Дону, 2002, с. 29).
27. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **33**, 416 (2003).
28. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Сборник тезисов докл. симп. «Лазеры на парах металлов и их применение»* (Ростов-на-Дону, 2004, с. 44).
29. Каретников А.А., Ковшик А.П. *Тезисы 3 междунар. конф. «Физика и промышленность 2001»* (Голицино, Московская обл., 2001, с. 151).
30. Eimer D. *Ferroelectrics*, **72**, 95 (1987).
31. Eimer D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zalkin A. *J. Appl. Phys.*, **62**, 1968 (1987).
32. Borsutzky A., Brunger R., Huang Ch., Wallenstein R. *Appl. Phys.*, **52**, 55 (1991).