

Д.А.Николаев, В.Б.Цветков, И.А.Щербаков

АДАПТИВНЫЙ ПЕТЛЕВОЙ РЕЗОНАТОР НА ОСНОВЕ ВЫРОЖДЕННОГО ПО ЧАСТОТЕ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕЩЕНИЯ

1. Введение.

В последнее время большое число публикаций посвящено исследованиям различных твердотельных матриц, активированных ионами Cr^{4+} , с целью разработки на их основе лазеров, перестраиваемых в практически важном спектральном диапазоне 1,2-1,6 мкм, а также использованию этих сред в качестве пассивных модуляторов добротности неодимовых лазеров. Вместе с тем, такие особенности Cr^{4+} -содержащих твердотельных сред, как наличие широких и интенсивных полос резонансного поглощения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, сравнительно большие времена жизни возбужденного состояния ионов Cr^{4+} , лежащие в микросекундном диапазоне, и большой ресурс работы, обуславливают перспективу их использования для целей обращения волнового фронта (ОВФ). В экспериментах по исследованию вырожденного четырехволнового смещения (ЧВС) в Cr^{4+} -содержащих средах были получены относительно низкие значения коэффициента отражения ОВФ-ЧВС-зеркал, не превышающие ~1% [1, 2]. Однако авторами была предложена специальная схема внутррезонаторной компенсации искажения лазерных пучков и улучшения пространственных, энергетических и поляризационных выходных лазерных параметров на основе Cr^{4+} -содержащих нелинейных сред - адаптивный петлевой резонатор [3-6]. Применение данной схемы позволяет эффективно использовать все вышеперечисленные положительные качества этих нелинейных сред.

2. Принцип действия лазера с адаптивным петлевым резонатором.

Адаптивный петлевой резонатор состоит из обычного резонатора, в котором в процессе развития генерации включается дополнительный ОВФ-резонатор, представляющий собой петлевою схему с параметрической обратной связью [7-10]. Принципиальная схема лазера показана на рис.1. Она состоит из глухого 1 и выходного 3 зеркал резонатора, активного элемента 4 и ЧВВ-активной среды 5. Поворотные зеркала 2 служат для создания внутррезонаторной петли, внутри которой расположен активный элемент. В начальный момент времени генерация развивается от концевых зеркал резонатора 1 и 3. По мере развития генерации, в ЧВВ активной

среде внутррезонаторными пересекающимися пучками записываются динамические голографические решетки А и Б. На образованных решетках происходит перерассеяние внутррезонаторных пучков таким образом, что часть излучения, выходящего из петлевой части резонатора возвращается в нее в виде излучения с обращенным волновым фронтом. Иными словами, внутри основного резонатора лазера возникает дополнительный петлевой резонатор с ОВФ-зеркалом и активным лазерным элементом внутри него.

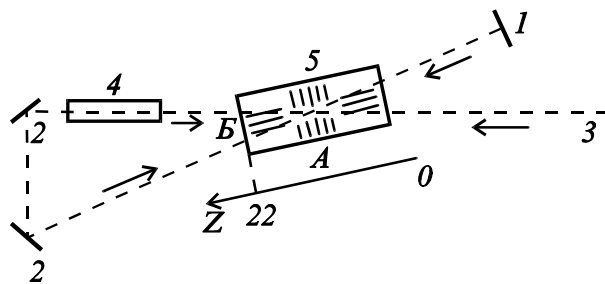


Рис.1. Схема лазера с адаптивным петлевым резонатором.

Помимо обращения волнового фронта, взаимное перерассеяние внутррезонаторных пучков на всех типах образованных в нелинейной среде динамических решеток, способно существенно менять генерационные условия, изменяя распределение поля внутри резонатора. Это также должно сказываться на выходных энергетических параметрах лазера.

В ходе проведения исследований было изучено влияние адаптивного петлевого резонатора на выходные энергетические, пространственные и поляризационные лазерные параметры.

3. Влияние адаптивного петлевого резонатора на выходные энергетические параметры лазера.

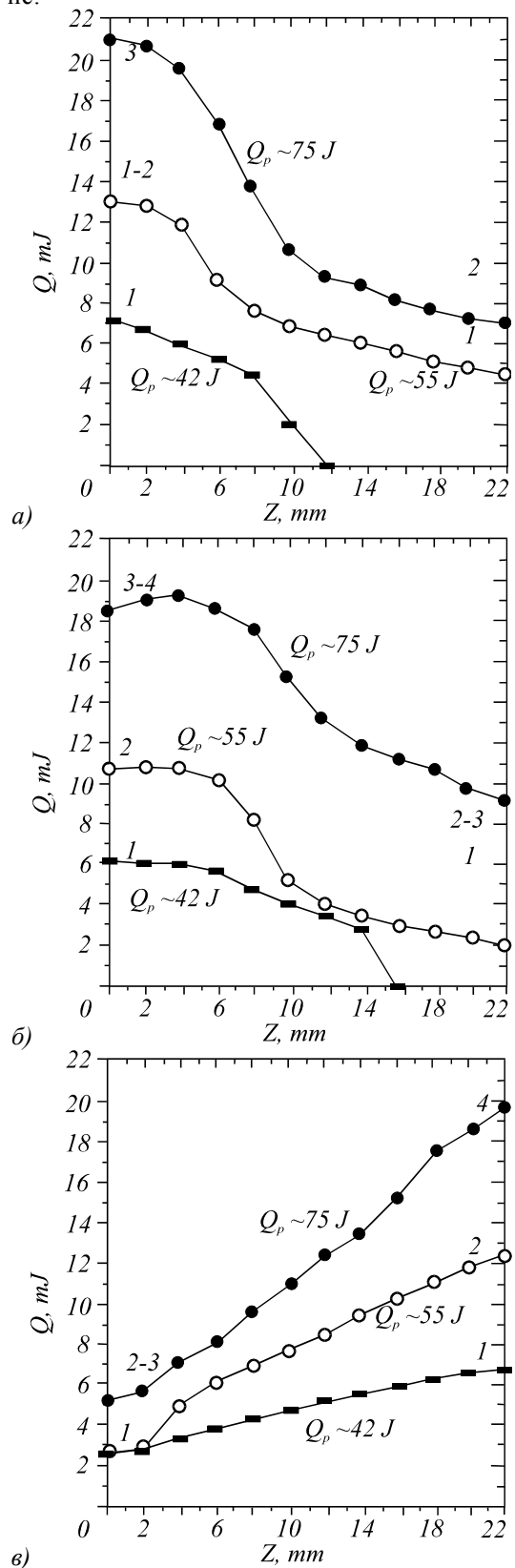
В ходе исследований проводилось сопоставление выходных энергетических параметров лазера с АПР с параметрами лазера с обычным линейным резонатором при сопоставимых экспериментальных условиях. Влияние дополнительного ОВФ-ЧВВ-резонатора на КПД лазерной генерации исследовалось как для случая одномодового (TEM_{00}) лазера, так и для случая широкоапертурного лазера.

Оптическая схема эксперимента соответствовала приведенной на рис.1. В качестве ЧВВ-активной среды 5 использовался кристалл

ИСГГ:Cr⁴⁺ Ø7.4x37 мм. Одновременно он служил пассивным модулятором добротности лазера. Начальное пропускание кристалла составляло ~57% ($\alpha_0 \sim 0,15 \text{ см}^{-1}$) на длине волны генерации 1,079 мкм. Пропускание при насыщении поглощения составляло ~90% ($\alpha \sim 0,03 \text{ см}^{-1}$) при плотности энергии излучения ~0.7 Дж/см² и длительности импульса по полувысоте ~50 нс. Плотность энергии насыщения составляла ~0.08 Дж/см². Время жизни верхнего уровня иона Cr⁴⁺ в кристалле ИСГГ при комнатной температуре составляет ~1,3 мкс. К качеству лазерного активного элемента 4 использовался кристалл Nd:YAlO₃ Ø6.3x60 мм. Для селекции одночастотного режима генерации моды TEM₀₀ в петлевую часть резонатора общей длины ~70 см между нелинейным элементом 5 и поворотным зеркалом 2 устанавливались диафрагма с диаметром отверстия 1,25 мм и дополнительный модулятор добротности - кристалл ИСГГ:Cr⁴⁺ (на рис.1 они не показаны). В случае многомодового лазера диаметр внутрирезонаторной диафрагмы был ограничен геометрией эксперимента и составлял 3 мм. Начальное пропускание дополнительного модулятора составляло ~30%. Углы между направлениями распространения пучков в нелинейной среде составляли ~4° и ~176°. Направление поляризации лазерного излучения было перпендикулярно плоскости рис.1. Оптическая накачка лазерной активной среды осуществлялась импульсной лампой-вспышкой. Работа велась при частоте повторения импульсов 5 и 10 Гц.

Влияние петлевого ОВФ-ЧВВ-резонатора на выходные лазерные параметры исследовалось следующим образом. Нелинейная среда в ходе проведения экспериментальных работ перемещалась вдоль оси Z так, как это показано на рис.1. Положение Z=0 соответствовало тому, что внутрирезонаторные пучки пересекались вне нелинейной среды и АПР работал в режиме обычного линейного резонатора. При положении Z=22 мм пересечение внутрирезонаторных пучков осуществлялось целиком внутри нелинейного кристалла. Результаты экспериментальных исследований зависимости энергии импульсов генерации одномодового лазера от положения нелинейной среды Z для различных значений коэффициента отражения выходного зеркала резонатора R= 18%), 26%, 35% и 55% приведены на рисунках 2а-г, соответственно. Соответствующие зависимости для случая многомодового лазера с коэффициентом отражения выходного зеркала 18% и 35% показаны на рисунке 3а-б. На каждом из этих рисунков приведены зависимости полученные при различных энергиях импульсов электрической накачки Q_p, подаваемой на лампу. При некотором превышении величины энергии накачки над ее пороговым значением начальных величин поглощения используемых пассивных модуляторов добротности было недостаточно

для поддержания однопикового режима генерации. Количество пиков, генерируемых лазером за время действия одного импульса накачки, показано цифрами в начальной и конечной точках каждой кривой. Длительности пиков лазерной генерации лежали во всех случаях в пределах 50-90 нс.



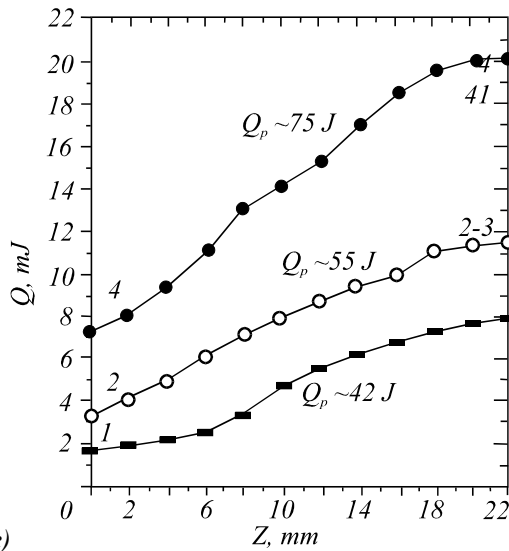
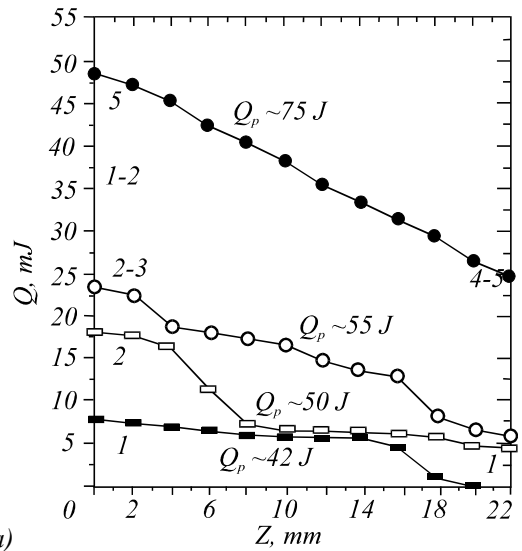
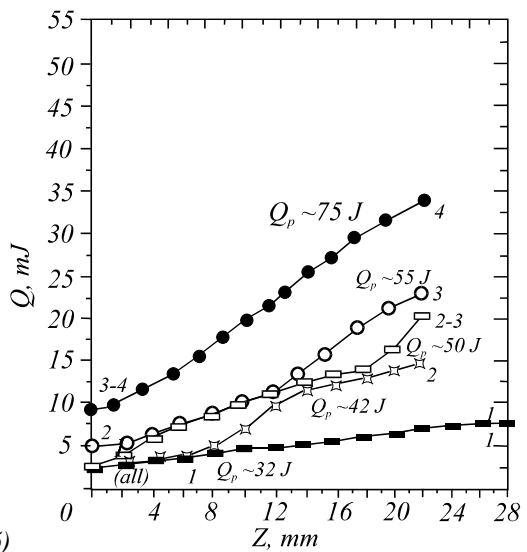


Рис.2. Зависимость энергии импульсов генерации Q одномодового лазера с АПР от положения нелинейной среды Z в резонаторе при различных энергиях импульсов накачки. Коэффициенты отражения выходного зеркала резонатора составляли 18% (а); 26% (б); 35% (в) и 55% (з).

Как следует из результатов экспериментальных исследований, приведенных на рисунках 2 и 3, существует область значений коэффициентов отражения выходного зеркала резонатора R (35%, 55%), при которых влияние дополнительного ОВФ-ЧВВ-резонатора приводило к существенному увеличению КПД генерации (до пяти раз в однопиковых режимах генерации одномодового лазера и до трех раз для многомодового лазера). При меньших значениях R (18%, 26%) наблюдалось уменьшение КПД. Этот факт качественно соответствовал результатам проведенных оценочных расчетов и объяснялся с учетом экспериментальных условий следующим образом. На процесс формирования динамических голографических решеток оказывали влияние как механизм насыщения поглощения, так и тепловой механизм. Длительность импульса генерации была много меньше времени релаксации тепловой решетки Б, но примерно на порядок превосходила время релаксации тепловой решетки А. Соответственно, вклад теплового механизма записи в образование решетки А был существенно меньше, чем для решетки Б. Неравноценность рассеяния на решетках А и Б приводила к тому, что при уменьшении величины R ниже определенного значения поле внутри резонатора перераспределялось таким образом, что его относительная интенсивность в петлевой части резонатора, где расположен активный элемент, уменьшалась. При приближении углов пересечения внутрирезонаторных пучков в нелинейной среде к 90° времена релаксации температурных решеток А и Б будут стремиться к одному значению и, ожидается, что увеличение КПД лазерной генерации будет наблюдаться и при меньших значениях R .



а)



б)

Рис.3. Зависимость энергии импульсов генерации Q широкоапертурного лазера с АПР от положения нелинейной среды Z при различных значениях энергии накачки. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора составлял $R=18\%$ (а) и $R=35\%$ (б).

4. Влияние АПР на пространственные параметры лазерного излучения.

В предыдущем разделе было показано, что дополнительный петлевой резонатор, входящий в состав АПР, может оказывать существенное влияние на КПД лазерной генерации. Это влияние связано, в значительной степени, с перераспределением внутрирезонаторного поля вследствие перераспределения излучения при ЧВВ. В то же время представляет большой интерес исследование возможности одновременного улучшения пространственных характеристик выходного излучения лазеров, у которых размер апертуры соответствует многомодовому случаю. Под улучшением пространственных характеристик понимается хорошее заполнение многомодовой апертуры резонатора излучением с малой расходимостью на выходе лазера.

Использование Cr^{4+} -содержащих твердотельных сред для этих целей в качестве нелинейных сред в лазерах с АПР является очень перспективным. Это связано с малостью присущих им величин интенсивностей насыщения поглощения и большими временами "памяти" динамических решеток, соответствующими временам жизни возбужденного состояния иона Cr^{4+} . На практике это соответствует тому, что динамические голографические решетки в этих нелинейных средах возникают уже в то время, когда генерация в лазере с АПР еще только развивается. Это доказывается поведением зависимости энергии импульсов генерации от положения нелинейной среды Z при малых энергиях накачки (нижние кривые на рисунках 2а-б и 3а). Из характера этих кривых видно, что влияние внутрирезонаторного ЧВВ приводило к полному прекращению генерации лазера с АПР, в то время когда условия генерации для линейного резонатора были выполнены (при положении $Z=0$ генерация наблюдалась). На самом начальном этапе развития генерации в широкоапертурном резонаторе преобладает излучение в виде моды TEM_{00} . Соответственно, динамические голографические решетки так же в основном записываются одномодовым излучением. Время жизни этих решеток превышает лавинный этап развития генерации. Поэтому они могут служить пространственным селектором малорасходящегося излучения и в широкоапертурных лазерах с АПР.

При проведении экспериментальных исследований использовался лазер с АПР, полностью аналогичный описанному в предыдущем разделе. Диаметр внутрирезонаторной диафрагмы составлял 3 мм.

Экспериментально исследовались диаметр пучка сразу на выходе из резонатора (заполнение внутрирезонаторной апертуры излучением) и его расходимость при различных положениях нелинейной среды Z и различных энергиях импульсов накачки, следующих с частотой повторения 10 Гц. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора составлял $R=35\%$. Результаты этих исследований приведены на рисунках 4 и 5. В случае, когда пересечение пучков осуществлялось целиком внутри нелинейной среды ($Z=22\text{мм}$), наблюдалось хорошее заполнение апертуры лазера внутрирезонаторным излучением, а расходимость выходного излучения соответствовала расходимости TEM_{00} моды линейного резонатора. В случае, когда пересечение пучков осуществлялось вне нелинейной среды ($Z=0$) и резонатор работал в режиме обычного резонатора, хорошего заполнения апертуры не наблюдалось во всем используемом диапазоне энергий импульсов накачки. Расходимость излучения увеличивалась с ростом энергии накачки. Таким образом, использование АПР позволяет эффективно использовать всю апертуру резонатора и одновременно получать на выходе из лазера излучение малой расходимости.

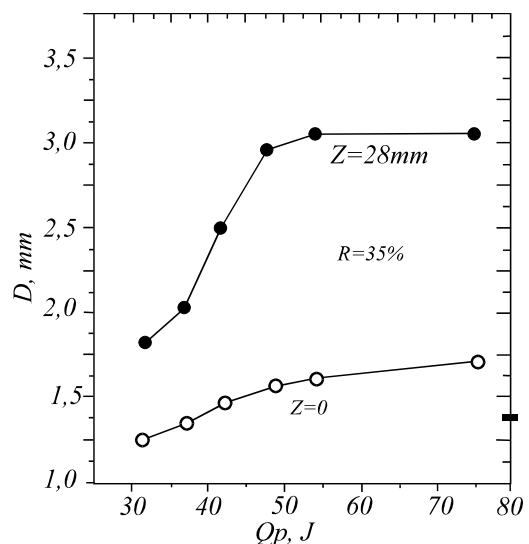


Рис. 4.- Зависимость диаметра выходного лазерного пучка D от энергии импульсов накачки Q_p .

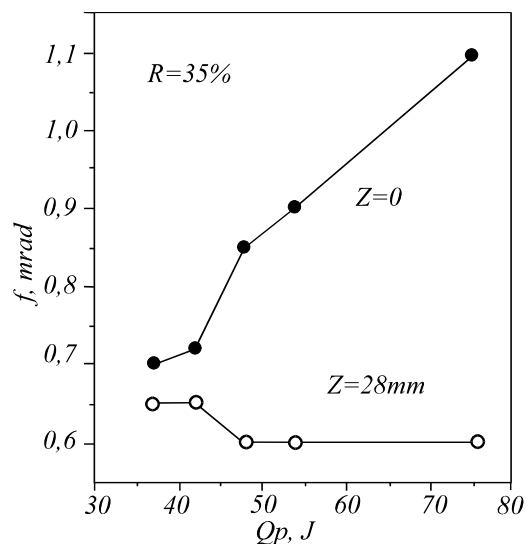


Рис.5. Зависимость расходимости лазерного излучения f от энергии импульсов накачки Q_p .

5. Поляризационные свойства адаптивного петлевого резонатора.

В предыдущих разделах было показано, что влияние перерасеяния внутрирезонаторных пучков способно приводить к существенным изменениям лазерных генерационных условий. При рассеянии излучения под углами близкими к углу Брюстера отражательные способности динамических голографических решеток существенно различны для пучков, поляризованных в плоскости падения, и пучков, поляризованных ортогонально по отношению к ней. Все это должно приводить к тому, что при рассеянии под углами, близкими к углу Брюстера, для двух ортогональных поляризаций внутрирезонаторного излучения будут созданы различные генерационные условия. Таким образом АПР должен обладать поляризационными свойствами и следует ожидать, что даже при использовании пространственно-изотропных активных сред, возможно

получение линейно-поляризованного выходного излучения лазера с АПР без использования внутри резонатора специальных селекторов поляризации. Для экспериментальных исследований поляризационных свойств АПР использовалась установка, схема которой была близка к схеме, изображенной на рис.1. Отличие состояло в том, что вместо двух поворотных зеркал 2 использовались три поворотные призмы. Угол пересечения пучков внутри нелинейной среды составлял $\sim 90^\circ$. В качестве активной среды использовался пространственно изотропный кристалл Nd:YAG диаметром 6мм и длиной 50мм. Нелинейной средой служил кристалл Sr^{4+} :ИСГГ, имевший форму куба с длинами граней 7,5 мм. Начальное пропускание кристалла на длине волны генерации составляло $\sim 65\%$. Коэффициент отражения выходного зеркала составлял $\sim 35\%$.

Экспериментально исследовалась степень поляризации выходного излучения лазера в зависимости от мощности накачки и в зависимости от степени принудительной деполяризации внутрирезонаторного излучения. В последнем случае в петлевую часть резонатора устанавливалась пластинка $\lambda/4$. Степень деполяризации исходного линейно-поляризованного излучения при этом могла варьироваться за счет вращения пластинки вокруг оптической оси резонатора. Мощность накачки варьировалась за счет изменения амплитуды и частоты следования электрических импульсов. Как показали результаты экспериментальных исследований, выходное лазерное излучение во всех случаях было поляризовано в направлении, перпендикулярном плоскости рис.1. Именно для этого направления поляризации отражательная способность динамических голографических решеток максимальная. Зависимость степени поляризации выходного излучения от мощности накачки показана на рис.6. При малых значениях мощности накачки степень поляризации выходного излучения была равна 1 с точностью до экспериментальной погрешности измерений, составлявшей 5% от измеряемой величины. С ростом мощности накачки степень поляризации выходного излучения падала до величины $\sim 0,57$ при максимальном значении мощности накачки равном $\sim 1,5$ кВт. Для сравнения на рис.6 показана аналогичная зависимость для случая, когда нелинейный кристалл был выведен из зоны пересечения внутрирезонаторного излучения перемещением, параллельным направлению распространения одного из внутрирезонаторных пучков. В этом случае выходное излучение было деполяризованным.

Зависимость степени поляризации выходного излучения от угла поворота пластинки $\lambda/4$ приведена на рис.7. Величина мощности накачки составляла при этом ~ 50 Вт. Даже в случае полной деполяризации внутрирезонаторного излучения степень поляризации выходного излучения была отлична от нуля. На рисунке 7 показана также относительная зависимость КПД лазерной генерации от угла поворота пластинки $\lambda/4$. Как видно из этой зависимости эф-

фективность АПР также зависит от степени деполяризации внутрирезонаторного излучения и уменьшается с ростом последней.

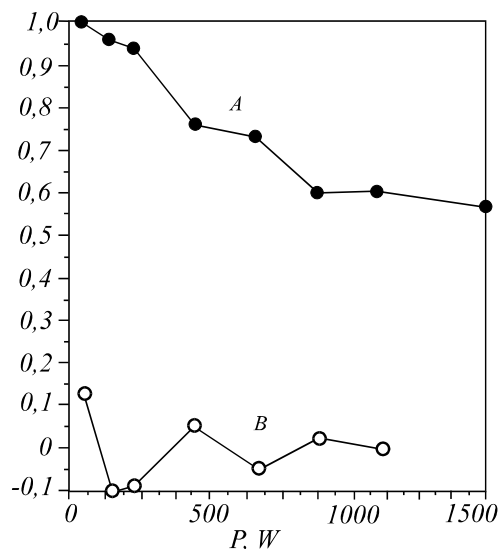


Рис.6. Зависимость степени поляризации Δ выходного излучения лазера с АПР (а) и обычным резонатором (б) от мощности накачки P .

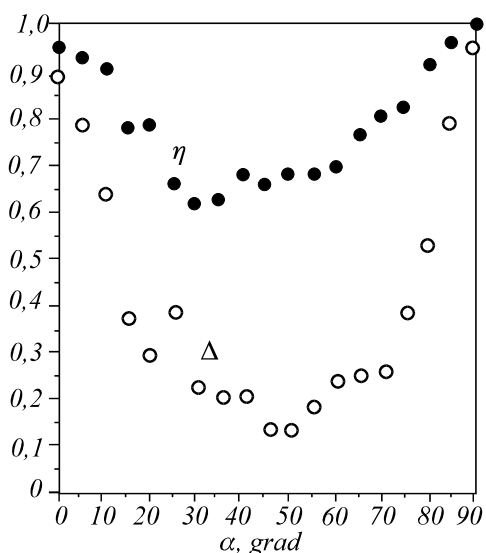


Рис.7. Зависимость степени поляризации выходного излучения Δ и КПД генерации η (в относительных единицах) лазера с АПР от угла поворота пластинки $\lambda/4$ в резонаторе.

В заключении настоящего раздела следует отметить, что параметры имевшегося в распоряжении авторов модулятора были не оптимальными, т.к. величина его начального пропускания была слишком высокой. При использовании более оптически плотных нелинейных сред следовало ожидать более сильного проявления поляризационных свойств АПР.

6. Заключение.

В результате проведенных исследований была предложена схема адаптивного петлевого резонатора на основе Sr^{4+} -содержащих твердотельных нелинейных сред. Использование АПР позволяет увеличивать

КПД лазерной генерации, получать хорошее заполнение внутрирезонаторной апертуры излучением при одновременном уменьшении расходимости выходного излучения. Продемонстрированы поляризационные свойства АПР, позволяющие получать линейно-поляризованное выходное излучение без использования дополнительных поляризационных селекторов.

7. Литература.

1. A.Brignon, J.-P.Huignard. Optics Communications.1994, v.110, №.717 994).
2. Г.А.Буфетова, И.В.Климов, Д.А.Николаев, В.Б.Цветков, Н.А.Щербаков. Краткие сообщения по физике, 1995, №3-4, с.67.
3. G.A.Bufetova, I.V.Klimov, D.A.Nikolaev, I.A.Shcherbakov, P.A.Studenikin, V.B.Tsvetkov, Yu.D.Zavartsev. Technical Digest of Advanced Solid State Lasers, USA, 1995, p.23.
4. Г.А.Буфетова, И.В.Климов, Д.А.Николаев, В.Б.Цветков, И.А.Щербаков. Квантовая электроника, 1995, т.22, с.791.
5. G.A.Buletova, I.V.Klimov, D.A.Nikolaev, I.A.Shcherbakov, V.B.Tsvetkov. Technical Digest of 8-th Laser Optical Conference. St.Peterburg, Russia, 1995, v.2, p.245.
6. G.A.Bufetova, I.V.Klimov, D.A.Nikolaev, I.A.Shcherbakov, V.B.Tsvetkov, A.Tuennermann, H.WeHing. В печати.
7. Одинцов В.И., Рогачева Л.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, с.281.
8. Gronin-Golomb I., Fisher A., White J.O., Yariv A. IEEE J. Quant.Electron, 1984, v.20, №.12.
9. Бельдюгин Н.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. Квантовая электроника, 1984, т.11, 0.887.
10. Николаев Д.А., Одинцов В.И. Квантовая электроника, 1989, т.16, с.878.