

Оптимизация ОВФ при ВРМБ в капилляре

О.В.Кулагин, В.И.Родченков

Экспериментально исследовано ОВФ лазерного излучения при ВРМБ в капилляре с $TiCl_4$. Получено сочетание сравнительно низкого порога ВРМБ пространственно-неоднородного излучения, высокого качества ОВФ и широкого динамического диапазона энергии обрабатываемого излучения. Для дальнейшего снижения порога ВРМБ в качестве нелинейно-оптической среды предложен и исследован PVr_3 .

Ключевые слова: вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, обращение волнового фронта, световод.

Благодаря простоте реализации обращение волнового фронта при ВРМБ остается одним из самых распространенных путей оптимизации параметров выходного излучения в различных лазерных системах. Для снижения пороговой энергии ВРМБ-зеркал, особенно в случае ОВФ пространственно-неоднородного излучения, часто используется волноводная геометрия возбуждения ВРМБ. Известен ряд работ [1–7], где для этого применялись многомодовые волоконные световоды, позволяющие снизить порог ВРМБ до нескольких десятков ватт при субмикросекундной длительности импульса [1, 3].

В более поздних работах [5–7] порог ВРМБ наносекундных импульсов снижен до 17 мкДж [6], продемонстрирована возможность ОВФ при ВРМБ непрерывного излучения, при этом порог ВРМБ составил 70 мВт [7]. Кроме того, экспериментально показано, что ОВФ маломодового излучения (например, компенсация крупномасштабных aberrаций) происходит с достаточно хорошим качеством [5, 6].

Однако качество ОВФ в световоде существенно зависит от условий ввода излучения в волокно и характеристик самого волокна [8]. В работе [8] и в цитируемой в ней литературе подробно исследованы основные причины ухудшения качества ОВФ при ВРМБ в световоде: уширение спектра обращенного излучения, различие волновых векторов волны накачки и обращенной волны, деполяризация. Уширение спектра обусловлено тем, что из-за необходимости острой фокусировки при вводе обрабатываемого излучения в волокно его расходимость сравнительно велика ($\theta \approx 0.1$ рад), поэтому вариации сдвига частоты в обращенном излучении $\delta\nu \sim \nu\theta^2/2$ (где ν – сдвиг частоты при ВРМБ) увеличиваются. Если эти вариации (равные приблизительно $2.6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ для плавленого кварца при длине волны падающего излучения 1.06 мкм [9]) становятся сравнимы с шириной линии ВРМБ $\Delta\nu \approx 1/(\pi\tau\sqrt{M})$ (где τ – время релаксации гиперзвука, $M \approx 20$ – инкремент усиления при ВРМБ, т. е. в плавленом кварце $\Delta\nu \approx 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$), то качество ОВФ падает. В работе

[10] такое уширение спектра обращенного излучения было исследовано экспериментально, в частности было показано соответствие измеренного уширения теоретическим оценкам.

Другой фактор, ограничивающий возможности ОВФ при ВРМБ в волокне, – рассогласование волновых фронтов падающей и обращенной волн из-за различия их волновых векторов. Длина такого рассогласования оценивается по формуле $l \approx k_s / [(k_i - k_s)k_i\theta^2]$, где k_i и k_s – соответственно волновые векторы падающей и отраженной волн, и для кварцевого волокна $l \approx 20$ см. Если инкремент усиления при ВРМБ на этой длине $M(l)$ сравнительно мал ($M(l) \sim 1$), то из-за рассогласования волновых фронтов преимущественное усиление обращенной составляющей в стоксовой волне будет уменьшаться, что означает снижение качества ОВФ [8]. Таким образом, оценка предельной длины волокна, при превышении которой ухудшается качество ОВФ при ВРМБ, дает $lM \approx 4$ м. Эти ограничения, а также ряд других гораздо менее существенны в жидкостях, применяемых для осуществления ВРМБ, поскольку в них и сдвиг частоты при ВРМБ, и время релаксации гиперзвука меньше более чем в 5 раз [9].

Целью данной работы было экспериментальное исследование ОВФ при ВРМБ в двухкюветной схеме, состоящей из ВРМБ-усилителя (кюветы с $TiCl_4$) и ВРМБ-генератора – кварцевого капилляра, заполненного $TiCl_4$ (рис.1). Такая конфигурация, помимо снижения порога ВРМБ по сравнению с порогом при обычной фокуси-

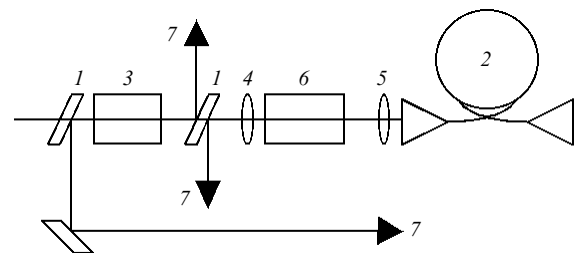


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – интерференционные поляризаторы; 2 – кювета-капилляр с $TiCl_4$; 3 – вращатель Фарадея; 4, 5 – проецирующие объективы; 6 – кювета с $TiCl_4$; 7 – измерители энергии.

ровке в объем, позволяет осуществлять ОВФ пространственно-неоднородного лазерного излучения в более широком динамическом диапазоне по энергии. Ограничителем, защищающим капилляр 2 от слишком большой интенсивности пучка накачки на входе в капилляр, является ВРМБ-усилитель (кювета 6), работающий в сфокусированном пучке.

Следует отметить известные нам работы по исследованию ВРМБ в жидкостных капиллярах [11, 12]. В работе [11] сообщается о 1000-кратном (до 13 Вт) снижении порога ВРМБ в капилляре (диаметр 10 мкм, длина 1 м), наполненном CS_2 . Однако в устройстве с настолько малой апертурой невозможно ОВФ пространственно-неоднородного излучения и мал динамический диапазон по энергии. В работе [12] исследована схожая двухкюветная схема для фазировки излучения многоканальных лазеров, однако размеры капилляра (диаметр 5 мм, длина 1 м) не позволили снизить порог ВРМБ. Кроме того, применявшаяся в обоих случаях конструкция (размещение капилляра внутри жидкостной кюветы) ограничивает возможности дальнейшего увеличения длины активной среды.

Отметим также, что схема с жидкостной нелинейно-оптической средой, кроме отмеченных выше преимуществ, менее критична к лазерному пробую рабочей среды (пробой в волокне выводит его из строя) и вносит меньшие поляризационные искажения. Для подтверждения этого воспользуемся получаемым из формул Френеля выражением для разности фаз δ двух поляризационных компонент волны накачки, вносимой при полном внутреннем отражении накачки:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \theta (\sin^2 \theta - n^2)^{1/2}}{\sin^2 \theta},$$

где n – отношение коэффициентов преломления граничащих сред. Как следует из оценок, сделанных для выбранной в эксперименте геометрии волновода ($\theta \approx 0.08$ рад), разность фаз достигает $\pi/4$ на участке капилляра длиной 13 см, тогда как для кварцевого волокна – на участке длиной 5.9 см. Таким образом, деполяризационное ограничение предельной длины усиливающей ОВФ-среды жестче для кварцевого волокна, т. к. если инкремент усиления ВРМБ на длинах такого масштаба мал ($M \leq 1$), то деполяризация приводит к нестабильности и снижению качества ОВФ. Подробное исследование влияния деполяризации на качество ОВФ при вынужденном рассеянии в световоде содержится в работе [13].

Схема эксперимента приведена на рис.1. В качестве ВРМБ-усилителя использовалась металлическая кювета длиной 40 см с апертурой 32 мм, заполненная $TiCl_4$. Генератором в этой схеме являлся изготовленный из кварцевого стекла капилляр длиной 330 см с апертурой 0.85 мм, также заполненный $TiCl_4$. Для удобства эксплуатации капилляр был герметично состыкован с входными кюветами и уложен в металлическом корпусе размером 40×40 см.

В эксперименте использовался лазер со следующими параметрами: длина волны 1.054 мкм, длительность импульса около 30 нс, расходимость пучка близка к дифракционному пределу, диаметр пучка перед линзой 4 приблизительно 8 мм, энергия импульса 1 мДж – 1.5 Дж. При внесении соответствующих фазовых пластин перед линзой 4 расходимость лазерного пучка увеличи-

валась примерно в 24 раза (до 2 мрад) и в 100 раз (до 8 мрад). Фокусное расстояние линзы 4 равнялось 12 см. Фокальная перетяжка пучка проецировалась из кюветы-усилителя на вход кюветы-капилляра объективом 5, расположенным на расстоянии 40–50 см от линзы 4. Этот объектив имел фокусное расстояние приблизительно 5 см и для уменьшения аберраций был составлен из двух линз с фокусными расстояниями по 10 см. Рабочие поверхности всей оптики и окон кювет были просветлены.

Для измерений энергии использовались калориметры ИМО-2Н и ИМО-3, а также фотодиоды ФД-24К с запоминающим осциллографом С8-17. При прямом прохождении лазерного пучка несколько процентов излучения, отражавшихся от правого поляризатора 1, использовались для измерения падающей энергии. При обратном прохождении отраженного от ВРМБ-зеркала излучения измерялись доля деполаризованного излучения, коэффициент отражения и качество ОВФ. Для измерений качества ОВФ отраженный пучок фокусировался линзой с фокусным расстоянием 5 м, а в фокальной перетяжке перед датчиком калориметра помещалась диафрагма диаметром 0.5 мм.

В ходе эксперимента измерялась сравнительная зависимость коэффициента отражения ВРМБ-зеркала от падающей энергии при трех расходимостях входного излучения ($8.3 \cdot 10^{-2}$, 2 и 8 мрад). При этом измерения проводились каждый раз в двух случаях – с закрытым и открытым капилляром, т. е. сравнивались обычное ОВФ при ВРМБ сфокусированного пучка и ОВФ при ВРМБ в двухкюветной схеме.

В случае ВРМБ одномодового излучения пороги в одно- и двухкюветном режимах различались незначительно (что соответствует оценкам, сделанным с учетом геометрии капилляра). Так, в однокюветном режиме при падающей энергии 1.2 мДж назад отражалось приблизительно 10 % энергии, а в двухкюветном режиме порог процесса снижался примерно в 1.25 раза, т. е. пороговая энергия W_{th} составляла приблизительно 0.9 мДж.

В случае многомодового излучения порог ВРМБ в однокюветном режиме возрастал пропорционально расходимости входного излучения, а при ВРМБ в двухкюветных порог возрастал незначительно, не более чем на 20–25 % при максимальной расходимости, что может быть обусловлено апертурными потерями той части падающего излучения, которая рассеивалась на фазовой пластине под широкими углами.

Результаты измерений коэффициента отражения многомодового излучения приведены на рис.2. По-видимому, при измерениях коэффициента отражения значительная часть отраженного излучения расходилась под широкими углами и не попадала в калориметр. Это обуславливало сравнительно небольшой коэффициент отражения и некоторое его уменьшение с увеличением энергии. Доля обращенного излучения, т. е. имевшего прежнюю дифракционно-ограниченную расходимость, достигала 60–80 % уже при 1.5–2-кратном превышении порога (который определялся по достижению 10%-ного отражения). При дальнейшем превышении порога качество ОВФ находилось в диапазоне 70–90 %. Следует отметить, что, хотя деполяризация отраженного излучения в двухкюветном режиме и увеличивалась (по сравнению с однокюветным режимом), в целом она не превышала 20 %.

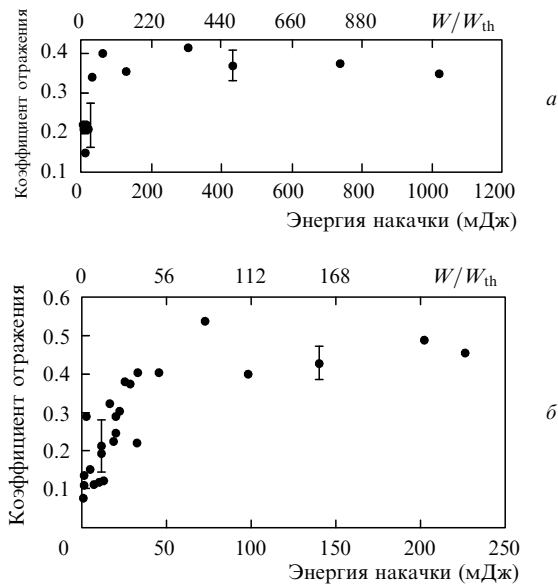


Рис.2. Зависимости коэффициента отражения ОВФ-зеркала от энергии накачки W и превышения энергии накачки над порогом ВРМБ W/W_{th} при расходимости пучка накачки 8 (а) и 2 мрад (б).

Дальнейшее снижение порога ОВФ возможно как при изменении геометрии капилляра, так и при замене используемой нелинейно-оптической среды. Уменьшение апертуры и удлинение капилляра могут быть нежелательными, как это видно из приведенных здесь оценок. Жидкости, которые могут применяться в качестве ВРМБ-среды в капилляре, должны иметь существенно больший, чем в плавленом кварце, коэффициент преломления и малое поглощение на рабочей длине волны. Этим требованиям соответствует Rb_3 , в котором при высоком коэффициенте преломления (1.697) нет заметного поглощения в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Для экспериментальной проверки была подготовлена кювета с особоистым Rb_3 , измерения поглощения в которой методом тепловой дефокусировки [14] дали значение $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ на длине волны 1.06 мкм. Порог же ВРМБ в Rb_3 оказался в 1.27 раза ниже порога ВРМБ в $TiCl_4$. Следовательно, такая замена рабочей среды позволит еще больше снизить порог срабатывания данного ОВФ-зеркала.

Таким образом, использование исследованной схемы двухкюветного ОВФ-зеркала (генератор-капилляр и усилитель-кювета) позволяет снизить порог ОВФ при ВРМБ пространственно-неоднородного излучения до порога ВРМБ одномодового пучка, обеспечивая при этом высокое качество ОВФ (0.7–0.9) и широкий динамический диапазон (более 10^3).

1. Басиев Т.Т., Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В., Мирон С.Б., Прохоров А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **36**, 85 (1982).
2. Петров М.П., Кузин Е.А. *Письма в ЖТФ*, **8**, 729 (1982).
3. Котельникова В.Г., Чертков А.А. *Квантовая электроника*, **12**, 826 (1985).
4. Кузин Е.А., Петров М.П., Давыденко Б.Е. *Письма в ЖТФ*, **10**, 833 (1984).
5. Eichler H., Kunde J., Liu B. *Optics Comms*, **139**, 327 (1997).
6. Heuer A., Menzel R. *Optics Letts*, **23**, 834 (1998).
7. Harrison R.G., Kovalev V.I., Lu W., Yu D. *Optics Comms*, **163**, 208 (1999).
8. Кривошеков В.А., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Квантовая электроника*, **13**, 1264 (1986).
9. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М., Наука, 1986, с.20).
10. Kovalev V.I., Harrison R.G. *Phys.Rev.Letts*, **85**, 1879 (2000).
11. Shalev S., Jackel S., Lallouz R., Borenstein A. *Opt.Engng*, **33**, 278 (1994).
12. Васильев А.Ф., Мак А.А., Маркосов С.А., Яшин В.Е. *Оптика и спектроскопия*, **63**, 225 (1987).
13. Зельдович Б.Я., Кривошеков В.А., Мамаев А.В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **43**, 16 (1986).
14. Бубис Е.Л., Дроботенко В.В., Кулагин О.В. и др. *Квантовая электроника*, **15**, 147 (1988).