

Лазер на парах бромида меди с длительностью импульса генерации до 320 нс

Ф.А.Губарев, В.Ф.Федоров, К.В.Федоров, Д.В.Шиянов, Г.С.Евтушенко

Сообщается о создании лазера на парах бромида меди с длительностью импульса генерации до 320 нс. Для удлинения импульса использовалась техника ограничения разрядного тока с помощью составного коммутатора на основе импульсных водородных тиатрона и тасистрона. Данная техника позволяет ограничивать возбуждение рабочих уровней на начальной стадии развития разряда, увеличивая время существования инверсии. Наибольшая длительность импульса генерации достигнута в трубках диаметром 25 и 50 мм при частотах следования импульсов 2–4 кГц.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, длинный импульс, инверсия, возбуждение.

1. Введение

Интерес к увеличению длительности импульсов генерации в лазерах на самоограниченных переходах металлов обусловлен рядом причин. До конца не ясны потенциальные возможности лазеров на парах металлов с точки зрения получения «длинного» импульса, востребованного в ряде практических задач. Под длинным импульсом будем понимать импульс генерации, длительность которого значительно (в пять раз и более) превышает типичные для лазеров на парах металлов значения (20–40 нс) [1–5]. Увеличение длительности импульса генерации представляет определенный интерес при создании систем с усилением яркости – лазерных мониторов [6–9], в которых длительность существования инверсии определяет максимально возможное расстояние до объекта наблюдения. Кроме того, большая длительность импульса генерации необходима для создания лазерных систем с высоким качеством пучка, т.е. с минимальной (дифракционной) расходимостью [10].

Длительность импульса генерации в лазерах на самоограниченных переходах в парах металлов зависит как от характеристик активной среды (геометрические размеры, давление буферного газа, концентрация паров рабочего вещества), так и от условий накачки. К таким условиям относятся форма импульса возбуждения и скорость нарастания тока через газоразрядную трубку (ГРТ).

Увеличение длительности импульса генерации можно осуществлять при изменении режимов работы как в схеме прямого разряда накопительного конденсатора (типовой для накачки лазеров на парах металлов), так и в нестан-

дартных схемах возбуждения. Так, увеличение длительности импульса генерации лазера на парах меди (ЛПМ) от 20 до 60 нс при уменьшении напряжения накачки, давления буферного газа и частоты следования импульсов (ЧСИ) наблюдалось в работе [11]. Наибольшая длительность импульса достигалась в трубке большего диаметра (26 мм по сравнению с 10 мм) при ЧСИ 1 кГц. В [12] увеличение длительности импульса от 60 до 80 нс имело место в лазере на парах бромида меди при уменьшении напряжения на выходе высоковольтного выпрямителя от 6 до 4 кВ.

В работе [13] в ЛПМ при снижении ЧСИ от 2 до 0.01 кГц отмечалось удлинение импульса генерации до 120 нс. Наибольшая длительность импульса генерации ЛПМ при использовании схемы прямого разряда накопительного конденсатора, равная 140 нс, получена в [14] при ЧСИ 0.5 кГц. В лазере на парах бромида меди наибольшая длительность импульса составила 100 нс при ЧСИ 3–5 кГц [15].

Полученные результаты согласуются с результатами оценок максимальной длительности импульса генерации в лазерах на самоограниченных переходах, выполненных в работе [16], согласно которой при возбуждении прямоугольным импульсом длительность импульса генерации не превышает 206 нс.

Существенно увеличить длительность импульса генерации можно путем управляемого ограничения тока разряда, т.е. путем формирования импульса возбуждения «сложной» формы [17, 18]. В работах [17, 18] этот импульс формировался с помощью тасистрона, включенного последовательно в разрядный контур. Изменение длительности импульса возбуждения позволяло регулировать длительность импульса генерации в диапазоне 3–200 нс [17] и получить максимальную на сегодняшний день длительность импульса генерации в ЛПМ 230 нс [18].

Практически все эксперименты по получению длинного импульса генерации проведены с ЛПМ. В то же время лазеры на парах бромида меди, активная среда которых характеризуется более высоким сопротивлением, интересны с точки зрения дальнейшего увеличения длительности импульса генерации. Поэтому целью данной работы является исследование возможности увеличения дли-

Ф.А.Губарев. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: gubarevfa@tpu.ru

К.В.Федоров, Г.С.Евтушенко. Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30

В.Ф.Федоров, Д.В.Шиянов. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1

Поступила в редакцию 1 ноября 2014 г., после доработки – 18 января 2015 г.

тельности импульса генерации в лазере на парах бромида меди.

2. Техника эксперимента

В эксперименте использовался активный элемент CuBr-лазера с внешним нагревом активной зоны, конструкция которого была рассмотрена ранее в [19–22]. Применялись пять трубок со следующими размерами: длина 90 см, внутренний диаметр 25 и 50 мм; длина 30 см, внутренний диаметр 6, 8 и 12 мм. Трубки помещались во внешний нагреватель для обеспечения схожего температурного режима при изменении ЧСИ. Независимо от нагрева активной зоны осуществлялся нагрев контейнеров с бромидом меди, температура которых автоматически стабилизировалась на уровне 710 К с точностью ± 5 К. Буферным газом служил неон при давлении 30 Тор.

Накачка проводилась с помощью тиратронного генератора (тиратрон ТГИ1-1000/25), построенного по схеме прямого разряда накопительного конденсатора (рис.1, таситрон Т2 закорочен). ЧСИ варьировалась от 1.5 до 11 кГц. Учитывая, что увеличение длительности импульса генерации наблюдается при относительно низком напряжении на выходе высоковольтного выпрямителя [11, 12], напряжение питания для всех экспериментов составляло 3.5–4.0 кВ при токе 150–200 мА.

При варьировании ЧСИ, для поддержания стабильного энерговклада, накопительная емкость C_s изменялась от 1650 до 4800 пФ. Интересно отметить, что величина емкости в указанном диапазоне не оказывала заметного влияния на длительность импульса генерации. Аналогичный результат наблюдался авторами работы [23] для ЛПМ.

При подключении таситрона ТГУ1-5/12 ток ограничивался путем изменения проводимости таситрона за счет изменения как накала генератора водорода, так и напряжения смещения на сетке. Регистрация импульсов напряжения, тока и генерации проводилась с помощью пробника напряжения Tektronix P6015A, датчика тока Pearson Current Monitor 8450 и коаксиального фотоэлемента ФК-22 соответственно. Средняя мощность излучения измерялась измерителем мощности Ophir 20C-SH. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на четырехканальный цифровой осциллограф LeCroy WJ-324. Синхронизация осциллографа осуществлялась по току через ГРТ.

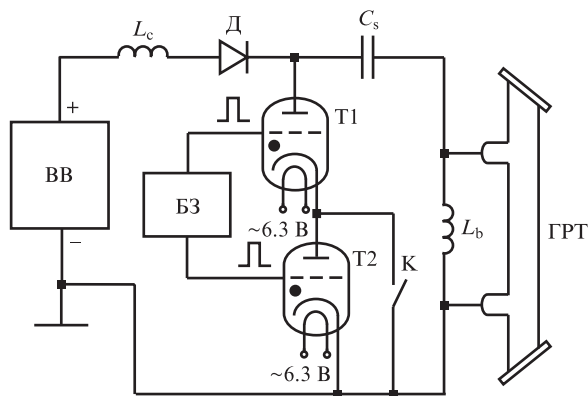


Рис.1. Схема накачки:

L_c и Д – зарядные дроссель и диод; C_s – накопительная емкость; L_b – шунтирующая индуктивность; К – переключатель; Т1 – тиратрон ТГИ1-1000/25; Т2 – таситрон ТГУ1-5/12; ВВ – высоковольтный выпрямитель; БЗ – блок запуска.

3. Результаты экспериментов

Исследования зависимости длительности импульса генерации от диаметра трубки и ЧСИ выполнялись при замкнутой перемычке К (рис.1), т.е. при возбуждении по схеме прямого разряда накопительного конденсатора без ограничения разрядного тока. Из результатов, представленных на рис.2, следует, что наибольшая длительность импульса генерации достигается в трубках наибольшего диаметра, что согласуется с результатами, полученными разными авторами в ЛПМ. При этом интересным с точки зрения увеличения длительности импульса является диапазон частот 2–4 кГц. Это связано с тем, что удельное сопротивление плазменного столба обратно пропорционально предимпульсной концентрации электронов n_{e0} , поэтому снижение частоты, следствием которого является уменьшение n_{e0} , приводит к увеличению сопротивления плазмы, а значит, к задержке развития разряда и созданию благоприятных условий для увеличения длительности существования инверсии. На рис.3 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока и генерации при различных ЧСИ для ГРТ диаметром 25 мм. Отчетливо видно увеличение задержки импульсов тока и генерации относительно импульса напряжения при уменьшении ЧСИ.

В лазерах на парах галогенидов металлов импульс накачки осуществляет не только возбуждение атомов металла, но и диссоциацию молекул галогенида и нагрев активной среды. Поэтому для данных лазеров характерно наличие нижнего порога генерации по ЧСИ. Для CuBr-лазеров, исследованных в настоящей работе, пороговой является частота около 2 кГц. При этой ЧСИ наблюдаются наибольшие длительности импульса генерации – 220 нс для ГРТ диаметром 25 мм и 260 нс для ГРТ диаметром 50 мм, что значительно больше достигнутых значений для лазеров на парах металлов и их галогенидов [10–15] в режиме неуправляемого разряда накопительного конденсатора.

Увеличение длительности импульса генерации наблюдается также при изменении концентрации паров рабочего вещества. Особенно явно это проявляется при включении/выключении нагрева контейнеров с бромидом меди. На рис.4 приведены осциллограммы для двух режимов работы лазера: стационарного и кратковременного (пе-

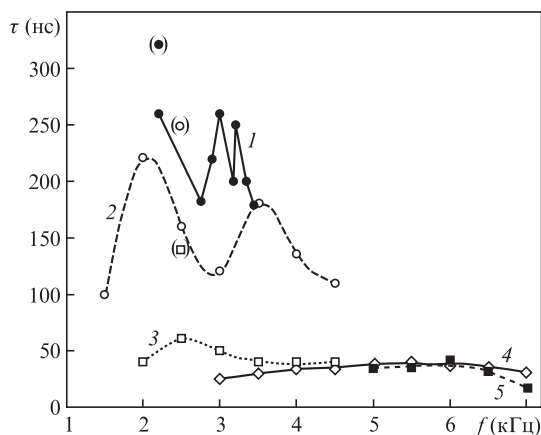


Рис.2. Зависимости длительности импульса генерации от ЧСИ для трубок диаметром 50 (1), 25 (2), 12 (3), 8 (4) и 6 мм (5). Точки без скобок соответствуют режиму с неуправляемым разрядом накопительного конденсатора, точки в скобках – значения длительности импульса генерации в режиме с ограничением тока для тех же ГРТ.

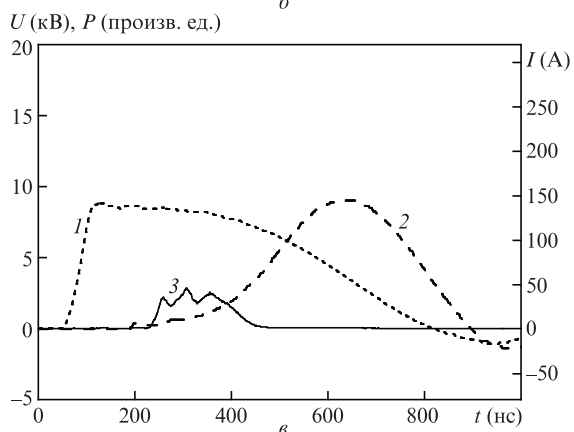
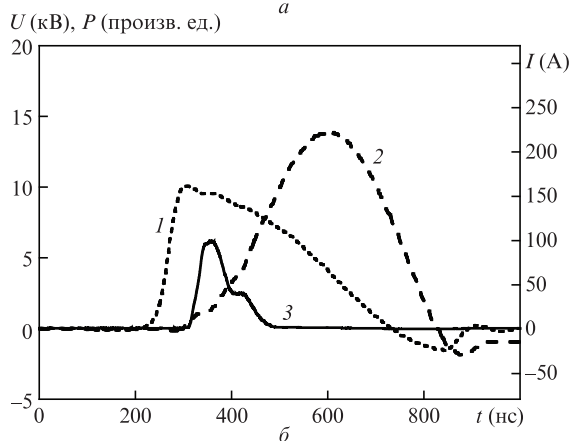
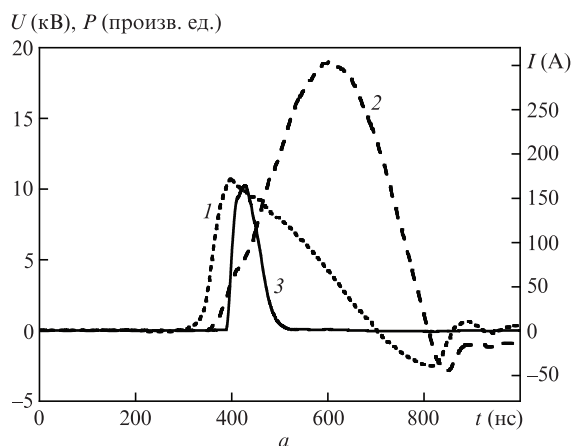


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (1), тока через ГРТ (2) и генерации (3) при ЧСИ 4.5 (а), 3.5 (б) и 2.0 кГц (в) для трубок диаметром 25 мм. Средняя мощность генерации, соответствующая рис.3.а, равна 220 мВт.

реходного). Применялся режим с ограничением тока с помощью таситрона (без переключки К). Таситрон работал в режиме самопробоя, импульс управления на сетку не подавался. В переходном режиме (рис.4,а) длительность импульса генерации существенно увеличивается (до 300 нс), что сопровождается затягиванием фронта напряжения. Это может быть вызвано более медленным развитием разряда в ГРТ и, как следствие, более поздним самопробоем таситрона, включенного последовательно с ГРТ.

На рис.5 представлены осциллограммы для ГРТ диаметром 12, 25 и 50 мм. Осциллограммы на рис.5,а–в зарегистрированы в режиме управления таситроном (без переключки К). Видно, что использование режима ограничения тока позволяет дополнительно увеличить длительность импульса генерации (рис.2). Так, для ГРТ диа-

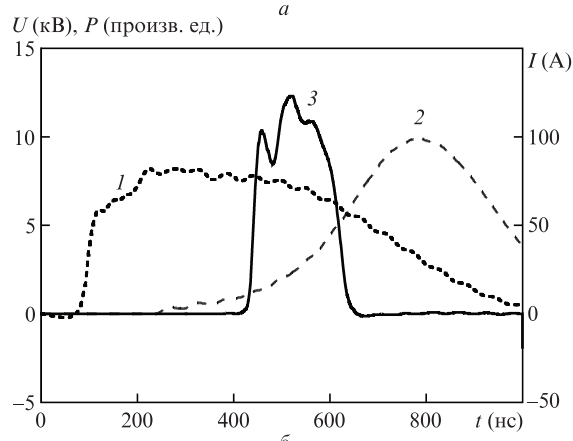
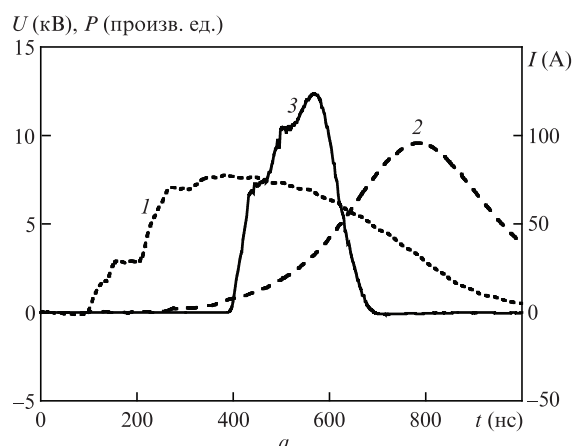


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и генерации (3) в переходном (а) и стационарном (б) режимах работы лазера при ЧСИ 2.2 кГц для ГРТ диаметром 25 мм.

метром 50 мм длительность импульса генерации увеличилась от 260 нс в обычном режиме возбуждения (рис.5,з) до 320 нс при ограничении тока (рис.5,в). При сильном запираии таситрона проявляется эффект «рассеченной» генерации (рис.5,б), когда на момент запираии таситрона генерация практически подавляется, а затем, по мере нарастания тока, возобновляется. Режим управления характеризуется значительным снижением напряжения на ГРТ.

4. Заключение

Представленные в работе результаты показывают, что в лазерах на самоограниченных переходах в парах металлов, в частности в лазерах на парах меди и бромида меди, существует реальная возможность получения импульсов генерации длительностью более 300 нс.

Увеличение длительности импульсов генерации в трубках среднего и большого диаметров происходит без применения специальных методов при работе на относительно низких для лазеров на парах галогенидов металлов ЧСИ (2–4 кГц).

Техника ограничения разрядного тока с помощью составного коммутатора на основе импульсных водородных тиратрона и таситрона позволяет ограничивать скорость накачки верхних рабочих уровней на начальной стадии развития разряда, увеличивая время существования инверсии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00175).

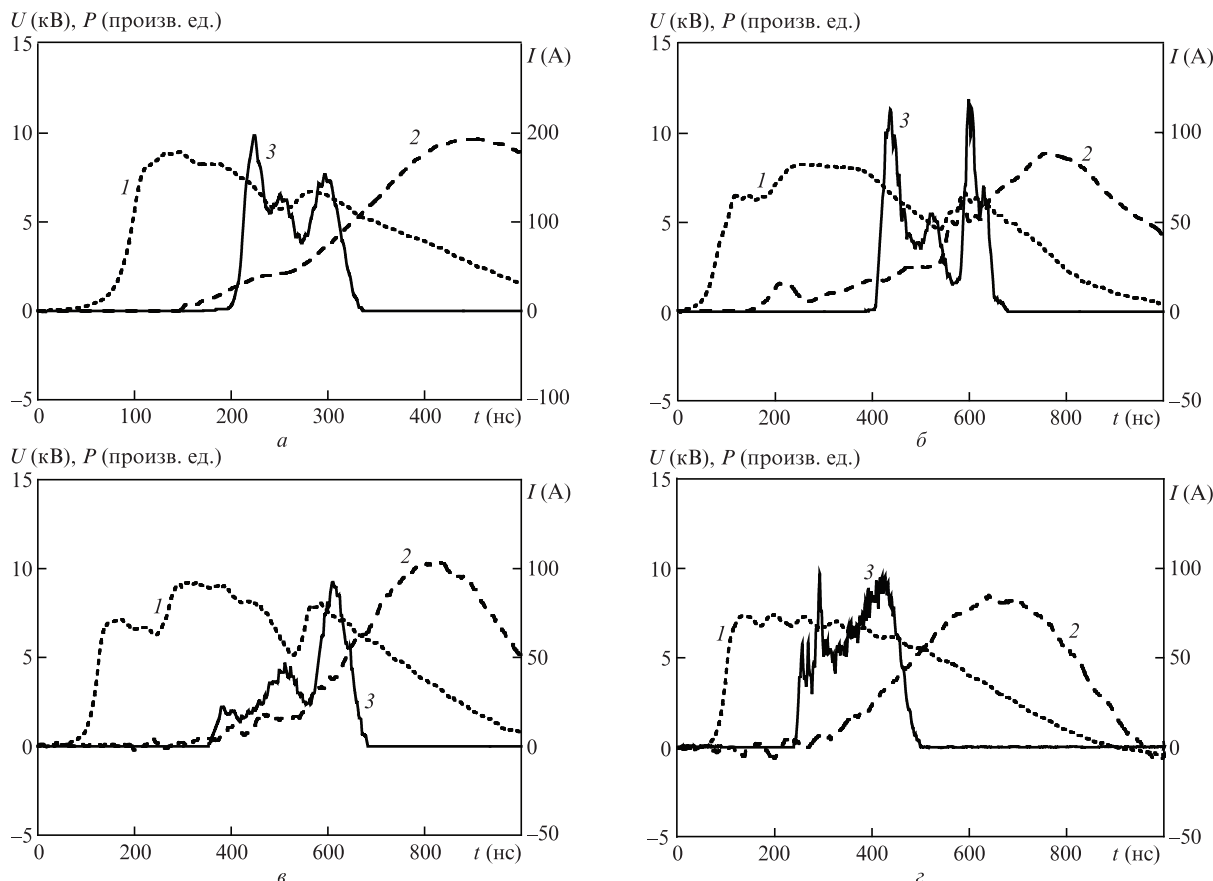


Рис.5. Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (I), тока через ГРТ (2) и генерации (3) при диаметрах трубок 12 (a), 25 ($б$) и 50 мм ($в$, $г$) для режимов с ограничением (a – $в$) и без ограничения ($г$) тока.

- Батенин В.М., Бохан П.А., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Карпухин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2* (М.: Физматлит, 2011, т. 2).
- Солдатов А.Н., Соломонов В.И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск: Наука, 1985).
- Little С.Е. *Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications* (Chichester, UK: John Willey & Sons Ltd, 1998).
- Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения* (М.: Физматлит, 2005).
- Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. *Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов* (Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010).
- Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 569 (2006).
- Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. *Прикладная физика*, № 3, 96 (2009).
- Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 033111 (2014).
- Тригуб М.В., Агапов Н.А., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **55**, 92 (2013).
- Солдатов А.Н., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **8**, 1626 (1995).
- Евтушенко Г.С., Кирилов А.Е., Кругляков В.Л., Полунин Ю.П., Солдатов А.Н., Филонова Н.А. *ЖЛС*, **49**, 745 (1988).
- Юдин Н.А., Суханов В.Б., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С. *Квантовая электроника*, **38**, 23 (2008).
- Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **10**, 974 (1983).
- Wang T.C., Yang C.Y. *J. Appl. Phys.*, **66**, 4653 (1989).
- Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. *Оптика атмосферы*, **2**, 1228 (1989).
- Бохан П.А. *Квантовая электроника*, **41**, 110 (2011).
- Солдатов А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **6**, 650 (1993).
- Evtushenko G.S., in *Pulsed Metal Vapour Lasers* (Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995).
- Gubarev F.A., Evtushenko G.S., Vuchkov N.K., Sukhanov V.B., Shiyonov D.V. *Rev. Sci. Instrum.*, **83**, 055111 (2012).
- Губарев Ф.А., Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 604 (2013).
- Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. *ПТЭ*, № 5, 95 (2012).
- Торгаев С.Н., Губарев Ф.А., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **54**, 81 (2011).
- Демкин В.П., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **6**, 659 (1993).