

УДК 621.373.8

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО CuBr-ЛАЗЕРА  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СКОРОСТНОГО  
ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРА**С.Н. Торгаев<sup>1,2</sup>, Д.С. Чертихина<sup>1</sup>, А.А. Шаклунов<sup>1</sup><sup>1</sup>Томский политехнический университет<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. ТомскE-mail: [torgaev@tpu.ru](mailto:torgaev@tpu.ru)

**Торгаев Станислав Николаевич**, инженер, ассистент кафедры Промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ; мл. науч. сотр. Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.

E-mail: [torgaev@tpu.ru](mailto:torgaev@tpu.ru)

Область научных интересов: физика лазеров, физика плазмы, активные оптические системы.

**Чертихина Дарья Сергеевна**, студент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: [belial1349@mail.ru](mailto:belial1349@mail.ru)

Область научных интересов: источники питания лазеров, физика лазеров, генераторы наносекундных импульсов.

**Шаклунов Александр Александрович**, студент кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: [a-shaklunov@mail.ru](mailto:a-shaklunov@mail.ru)

Область научных интересов: физика лазеров, физика плазмы.

Представлены оценки максимальных температур источников как внешней, так и собственной засветки, при которых будут иметь место искажения изображений, формируемых посредством активных оптических систем. Показана возможность использования высокочастотного CuBr-лазера в качестве усилителя яркости лазерного монитора.

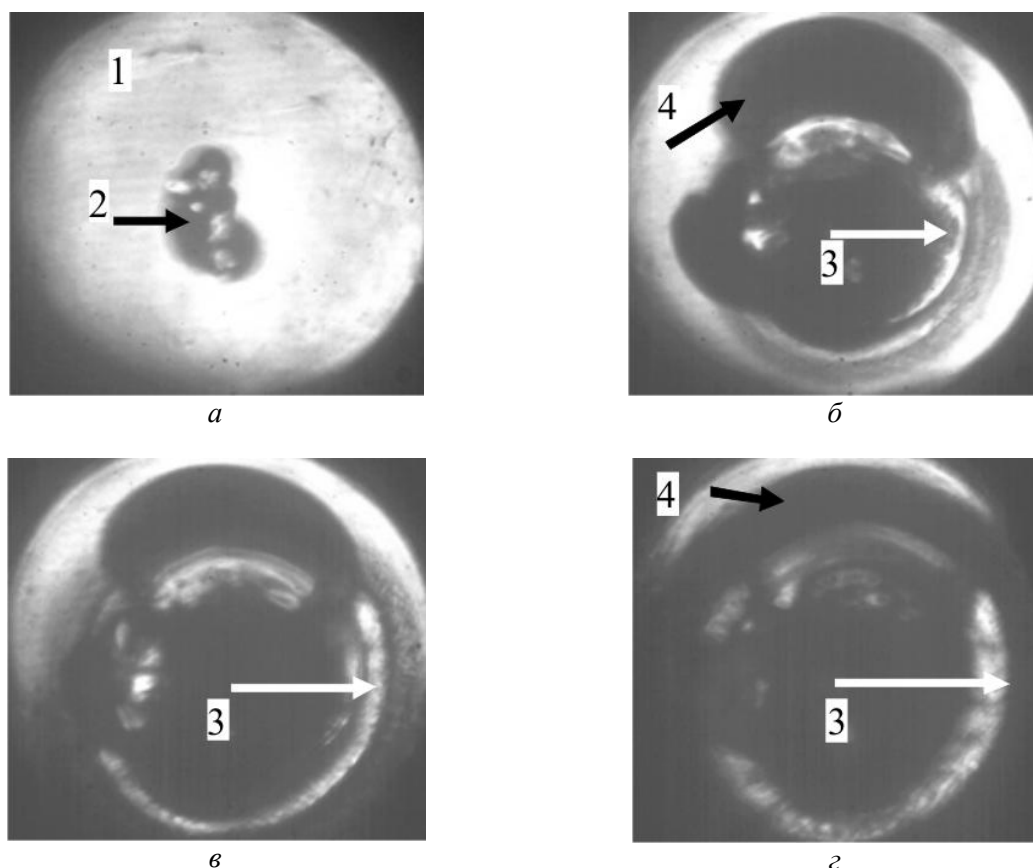
**Ключевые слова:**

Газоразрядная трубка, лазер на парах бромиды меди, частота следования импульсов, активная оптическая система, лазерный микроскоп (монитор).

Одним из наиболее перспективных применений лазеров на парах металлов является их использование в качестве усилителей яркости в активных оптических системах [1, 2]. В работе [3] было представлено устройство, позволяющее получать увеличенное и усиленное по яркости изображение объекта на большом экране. В качестве оптического усилителя применялся лазер на парах меди, работающий с частотой повторения импульсов 10 кГц. Лазерный проекционный микроскоп, описанный в данной работе, позволяет получать усиленное в несколько тысяч раз изображение. Описанный в работе [3] эксперимент, показал, что на основе лазеров на парах металлов, работающих в режиме сверхсветимости, можно строить активные оптические системы, способные обеспечить высокие увеличения микрообъектов высокой яркости на больших экранах.

Усилители яркости на основе активных элементов лазеров на парах меди и бромиды меди позволяют осуществлять в режиме реального времени визуализацию процессов, скрытых от наблюдателя мощной фоновой засветкой. Такие устройства, по предложению И.И. Климовского, называют «лазерными мониторами» [4, 5].

На рис. 1 приведены изображения, полученные с помощью скоростной цифровой камеры в процессе воздействия лазерного излучения на поверхность стеклоуглерода, представляющие собой отдельные кадры скоростной видеозаписи [5]. На рис. 1 приведены четыре изображения воздействия лазерного излучения на образец в разные моменты времени. Пятно фокусировки составляло  $d \sim 0,1$  мм, а поле зрения  $\sim 0,3$  мм.

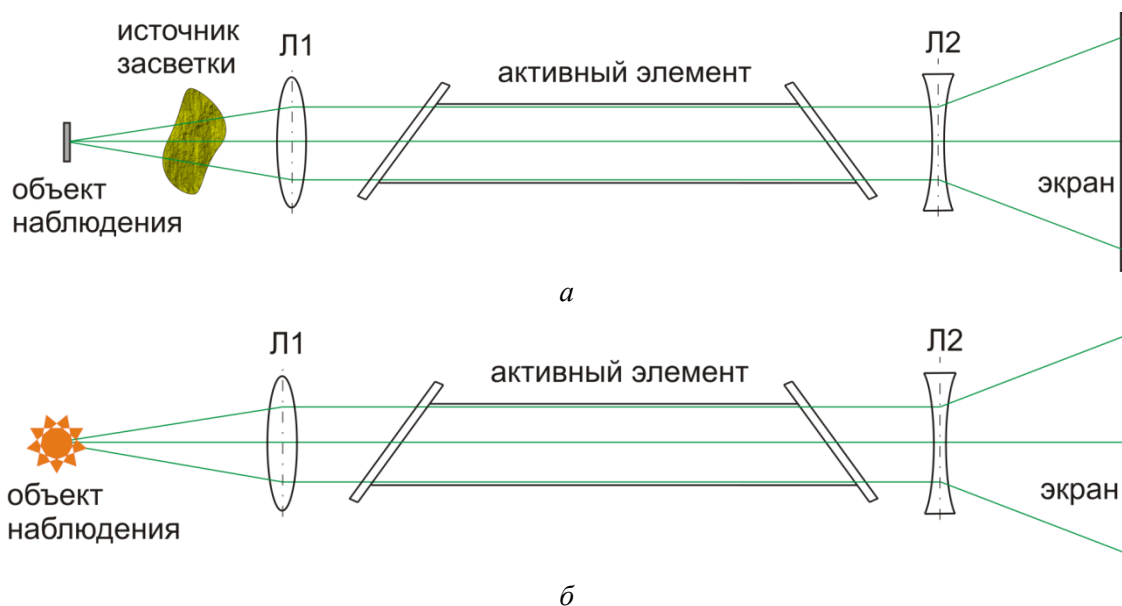


**Рис. 1.** Воздействие лазерного излучения на поверхность стеклоуглерода (мощность воздействия  $P = 44$  Вт) [5] (1 – зона наблюдения, 2 – плавление углерода, 3 – перемещение светлого кольца, 4 – области термического влияния): а) начало воздействия; б) время воздействия  $t_{\text{возд}} = 2$  с; в)  $t_{\text{возд}} = 4$  с; г) после окончания воздействия

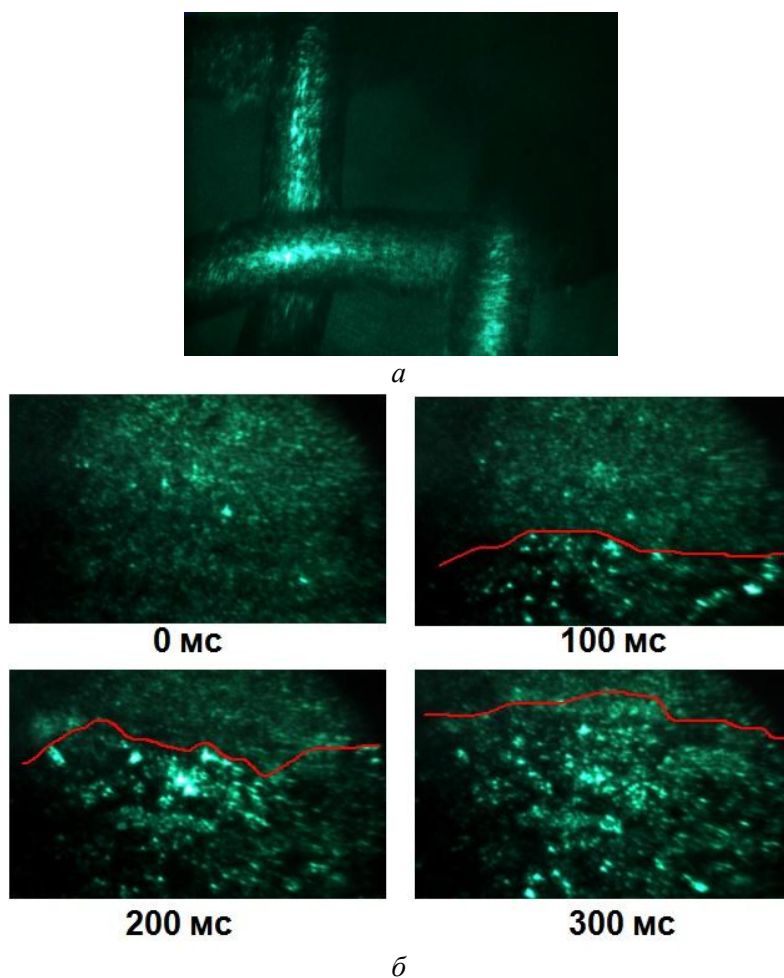
Работы по разработке лазерного монитора начались в лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы СО РАН, г. Томск и на кафедре промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета в 2008 г. Основой для постановки данной работы явились: необходимость диагностики и неразрушающего контроля объектов и процессов в условиях мощной фоновой засветки; опыт создания лазеров на парах меди и бромида меди с высокой частотой следования импульсов излучения (свыше 100 кГц), умение работать со скоростными видеорегистраторами.

Фоновая засветка, как указано выше, может быть как внешней (рис. 2, а), так и собственной, когда сам объект является источником засветки (рис. 2, б). На рис. 3 представлены результаты визуализации объектов в условиях собственной фоновой засветки. На рис. 3, а показано изображение металлической сетки размером 0,75 мм в условиях внешней фоновой засветки [6]. Для засветки использовалась дуга сварочного аппарата с температурой порядка 5000...10000 К. На рис. 3, б представлены результаты визуализации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [7]. В данном случае исследуемый объект является источником засветки с яркостной температурой порядка 2000 К. Эти работы проведены совместно с сотрудниками отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

Представленные данные получены при частоте следования импульсов излучения 30 кГц и частоте регистрации 4 кГц, т. е. с разрешением по времени порядка  $10^{-3}$  с. CuVr-лазер с диаметром разрядного канала 20 мм работал в режиме усилителя, а в качестве регистратора использована камера HISPEC Fastek 1 с максимальной скоростью регистрации  $10^5$  кадров в секунду.



**Рис. 2.** Оптическая схема лазерного монитора при наличии засветки: а) внешний источник засветки; б) источником засветки является сам объект; Л1, Л2 – линзы



**Рис. 3.** Результаты визуализации объектов в условиях фоновой засветки посредством лазерного монитора: а) объект в условиях внешней фоновой засветки ( $T \approx 5000 \dots 10000$  К); б) процесс горения СВС структуры ( $T \approx 2000$  К), скорость съемки 2000 кадров/сек (размеры по осям ординат и абсцисс – 1,5 и 3 мм, соответственно)

Временное разрешение активных оптических систем ограничено частотами работы видеорегистратора и усилителя яркости. На данный момент существуют видеорегистраторы, имеющие скорость съемки до  $10^6$  кадров/с. А частота следования импульсов излучения CuBr-лазера достигает 700 кГц [8] – максимальное на сегодня значение для лазеров на самоограниченных переходах атома меди. Однако CuBr-лазер с высокой частотой следования импульсов имеет относительно небольшую среднюю мощность излучения и энергию в импульсе, тем более в режиме сверхсветимости (в отсутствии резонатора). И в этом случае можно предполагать, что спонтанное излучение (собственный шум усилителя яркости) может оказаться одного порядка с вынужденным. А это приведет к существенному искажению получаемого изображения [2]. Другим фактором искажения изображения будет засветка (внешняя, либо собственная).

Для оценки максимальной (яркостной) температуры исследуемого объекта (случай собственной засветки) или источника внешней засветки, при которой они также не вносили бы искажения в получаемое с лазерного монитора изображение, необходимо рассчитать собственный шум усилителя яркости и сопоставить его с энергией засветки и энергией сверхизлучения.

Расчет мощности шума усилителя яркости, обусловленного спонтанным излучением, произведем для двух типов активных элементов (газоразрядных трубок – ГРТ) при различных условиях. С использованием ГРТ № 1, с большим активным объемом, получена частота следования импульсов генерации до 100 кГц [9], а на ГРТ № 2, с малым активным объемом, – до 700 кГц [8]. Данные для расчета представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры ГРТ и исходные данные для расчета

| Параметр   | ГРТ № 1 | ГРТ № 2 |
|--|---------|---------|
| Диаметр ГРТ, см                                  | 2       | 0,7     |
| Длина активной зоны, см                          | 50      | 14      |
| Частота работы, кГц                              | 100     | 500     |
| Длительность импульса генерации по основанию, нс | 40      | 20      |
| Температура газа, К                              | 2300    | 2100    |
| Вводимая в ГРТ мощность, Вт                      | 1200    | 350     |
| Выходная мощность, Вт                            | 2,7     | 0,12    |
| Длина волны, нм                                  | 510,6   |         |

Для расчета мощности собственных шумов усилителя необходимо определить ширину линии излучения –  $\Delta\nu$ . Основным механизмом уширения линии будем считать доплеровское уширение [2]. Следовательно, ширина контура линии на полувысоте определяется выражением

$$\Delta\nu = 7,16 \cdot 10^{-7} \cdot \nu \cdot \sqrt{\frac{T_g}{M}},$$

где  $\nu$  – частота, соответствующая центру линии, которая определяется как  $\frac{c}{\lambda}$ .

Выражение для средней мощности шума на входе усилителя определяется выражением [2]

$$P_{\text{ш}} = h \cdot \nu \cdot \Delta\nu \cdot \frac{\tau_{\text{инв}}}{T} \cdot \left( \frac{d^2}{\lambda \cdot L} \right)^2,$$

где  $T$  – период повторения импульсов.

Импульсная энергия собственных шумов усилителя яркости определяется соотношением:

$$E_{\text{ш}} = P_{\text{ш}} \cdot \tau.$$

Таким образом, импульсная энергия собственных шумов усилителей яркости (ГРТ № 1 и ГРТ № 2) составляют:

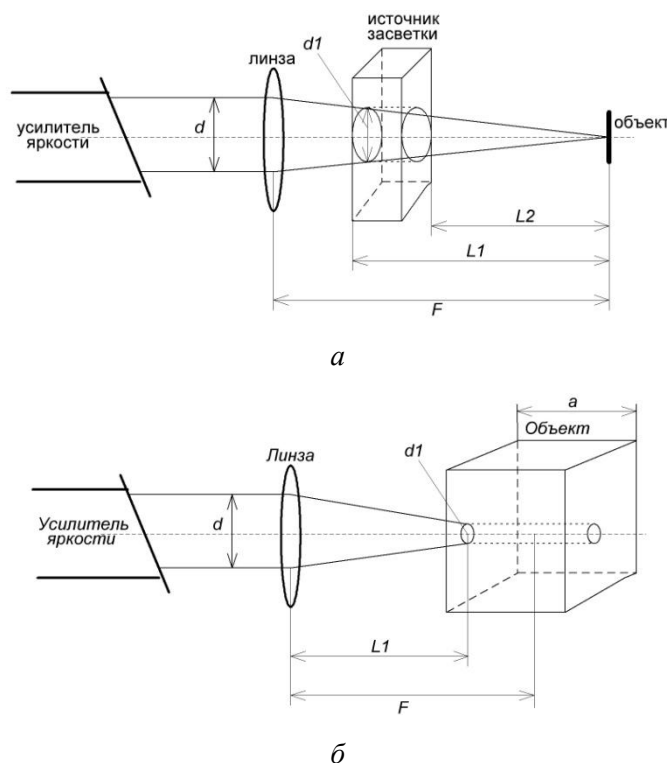
$$E_{\text{шГРТ.№1}} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{шГРТ.№2}} = 8,7 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

При оценке температуры источника внешней засветки необходимо рассмотреть два случая:

1. Внешний источник засветки, когда источник засветки расположен между объектом и усиливательной средой.
2. Объект с собственной засветкой, когда сам объект является источником засветки.

На рис. 4 представлены оптические схемы с внешним источником засветки (рис. 4, а) и схема лазерного монитора для случая, когда источником засветки является сам объект (рис. 4, б):



**Рис. 4.** Оптическая схема лазерного монитора: а) при внешнем источнике засветки, б) источником засветки является сам объект

Оценка энергии излучения источника засветки проводилась в приближении абсолютно черного тела (худший случай). Выражение для спектральной плотности мощности излучения абсолютно чёрного тела (формула Планка) имеет следующий вид [10]:

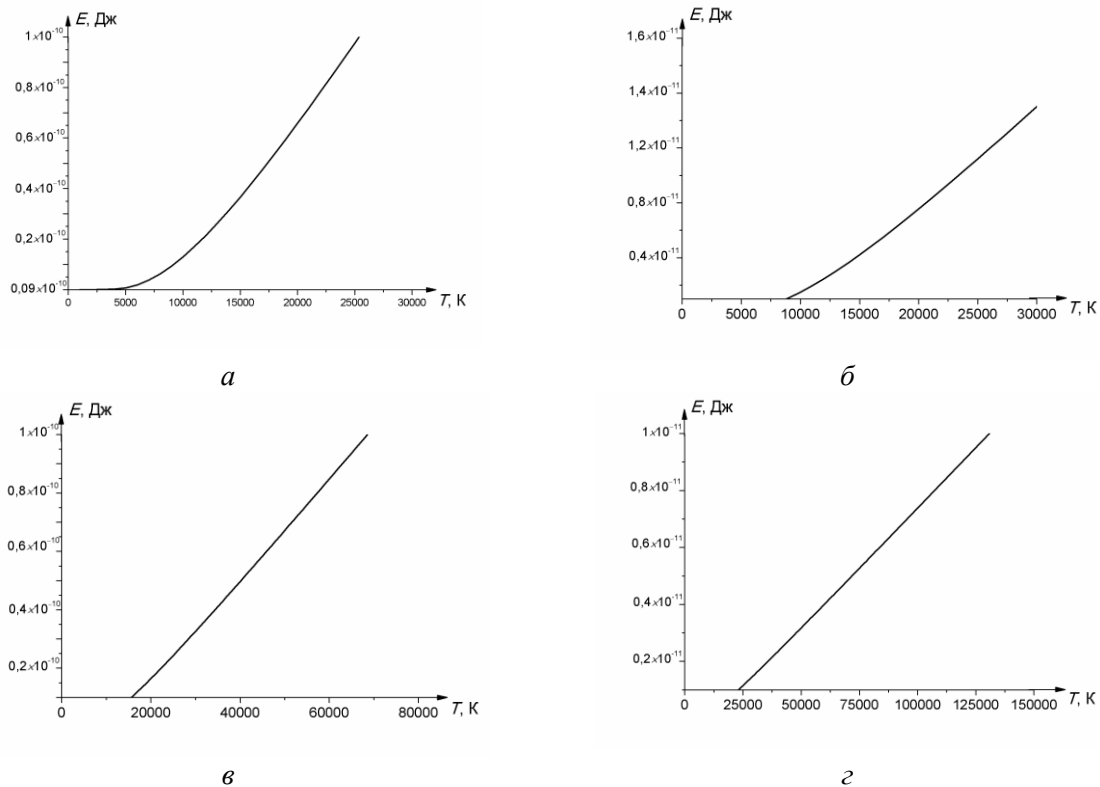
$$U(T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота, соответствующая центру линии;  $c$  – скорость света;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура источника засветки. Данное выражение описывает спектральную плотность мощности излучения с единицы объема. Для определения энергии излучения на данной длине волны необходимо умножить спектральную плотность излучения на ширину контура линии (доплеровское уширение). Таким образом, энергия излучения источника засветки на данной длине волны (с учетом уширения) определяется выражением [10]:

$$E(T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \cdot \Delta\nu \cdot V.$$

где  $V$  – объем области источника засветки, который попадает в область проецируемого на объект пучка.

На рис. 5 представлены зависимости энергии излучения источника засветки от температуры, рассчитанные для ГРТ № 1, в случае внешней фоновой засветки (рис. 5, а) и в случае, когда сам объект является источником засветки (рис. 5, б). Также представлены аналогичные зависимости для ГРТ № 2 (рис. 5, в, г).



**Рис. 5.** Зависимость энергии излучения источника засветки от температуры

В активных оптических системах CuVr-лазер работает в режиме сверхсветимости. Следовательно, для расчета средней энергии излучения необходимо оценить мощность излучения для ГРТ № 1 и ГРТ № 2 при работе без резонатора. Так как в лазерном мониторе изображение формируется в отраженном свете, то при расчете мощности полезного сигнала необходимо учесть коэффициент отражения объекта. Примем, что мощность в режиме сверхизлучения на порядок меньше, чем в обычном режиме (также оценка на худший случай), а коэффициент отражения объекта равен 0,5. Тогда для ГРТ № 1 и № 2 будем иметь:

$$P_{\text{ГРТ № 1}} = \frac{2,7 \text{ Вт}}{10} \cdot 0,5 = 0,135 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ГРТ № 2}} = \frac{0,12 \text{ Вт}}{10} \cdot 0,5 = 0,006 \text{ Вт}.$$

Рассчитаем энергию излучения для ГРТ № 1 и № 2:

$$E_{\text{ГРТ № 1}} = \frac{P_{\text{ГРТ № 1}}}{f} = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{ГРТ № 2}} = \frac{P_{\text{ГРТ № 2}}}{f} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}.$$

В табл. 2 представлены результаты проведенных выше расчетов.

**Таблица 2.** Результаты расчетов

| Параметр   | ГРТ № 1              | ГРТ № 2              |
|--|----------------------|----------------------|
| Энергия спонтанного излучения, Дж  | $9 \cdot 10^{-11}$   | $8,7 \cdot 10^{-12}$ |
| Максимальная температура в условиях внешней засветки, К                              | 22000                | 23000                |
| Максимальная температура при условии, что объект сам является источником засветки, К | 60000                | 110000               |
| Энергия сверхсветимости, Дж  | $1,35 \cdot 10^{-6}$ | $1,2 \cdot 10^{-8}$  |



Из табл. 2 видно, что максимальные температуры как источника внешней засветки, так и собственной засветки объекта, при которых будет иметь место искажение формируемого изображения, достаточно велики. При этом энергия сверхизлучения усилителя яркости, работающего на частотах 100 и 500 кГц, на несколько порядков превосходит энергии фоновой засветки и собственного спонтанного излучения. Это показывает возможность применения CuBr-лазера с высокой частотой следования импульсов для создания быстродействующих активных оптических систем (скоростных лазерных мониторов). При этом остается вопрос, а хватит ли энергии, отраженной от объекта, для эффективного снятия инверсии в активной среде и формирования изображения объекта высокого качества. Это и будет предметом дальнейших экспериментов.

*Авторы статьи выражают благодарность Шиянову Д.В. и Нехорошеву В.О. за неоценимый вклад в создание CuBr-лазера с высокой частотой следования импульсов генерации и изготовление активных элементов усилителей яркости, Тригубу М.В. за проведение экспериментальных исследований по визуализации процессов скрытых мощной фоновой засветкой.*

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание №7.586.2011.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические системы с усилителями яркости / под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991. – 152 с.
2. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. – Горький: ИПН АФ СССР. – 1988. – 173 с.
3. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – № 1. – С. 14–15.
4. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 6. – С. 569–575.
5. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жарёнова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 97–101.
6. Евтушенко Г.С., Тригуб М.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный проекционный микроскоп с покадровой регистрацией изображения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 154–158.
7. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Юсупов Р.А., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н., Шиянов Д.В. Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 181–184.
8. Нехорошев В.О., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов до 700 кГц // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – № 10. – С. 877–879.
9. Торгаев С.Н., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В. Моделирование CuBr-Ne-HBr-лазера при высоких частотах следования импульсов накачки // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 54–60.
10. Методы исследования плазмы / под ред. В. Лохте-Хольтгревена. – М.: Мир, 1971. – 552 с.

Поступила 27.03.2013 г.