

Томограф А1040М «Полигон» позволяет визуализировать внутреннюю структуру бетона ОК практически в режиме реального времени, а также получить достоверные данные о местоположении дефекта и толщине конструкции ОК.

Однако в процессе использования томограф А1040М «Полигон» были выявлены и ряд недостатков:

- относительная сложность интерпретации результатов;
- высокая степень влияния человеческого фактора;

#### **Список использованных источников**

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 3 – М. : Машиностроение – 2008 – С. 864
2. Клевцов В.А., Коревицкая М.Г., Матвеев Ю.К. Применение неразрушающих методов испытаний при обследовании монолитных конструкций // Бетон и железобетон – 1991 – № 7 – С. 1920
3. Hoegh K, Khazanovich L., Yu H. T. Ultrasonic tomography for evaluation of concrete pavements // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board – 2011 – V. 2232 – № 1 – P. 85–94
4. Mayer K. et al Characterization of reflector types by phase-sensitive ultrasonic data processing and imaging // Journal of Nondestructive Evaluation– 2008– P. 35–45
5. Bishko A., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.– 2008
6. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G. Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities// The 5th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry– Moscow, Russia– 2006– P. 152
7. NDTpribor.ru [Электронный ресурс] / Описание томографа А1040М Полигон. – Режим доступа: <http://www.ndtpribor.ru/product/tomograf-a1040m-poligon> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус\_(дата обращения: 02.07.14)
8. Неразрушающий контроль [Электронный ресурс] / Ультразвуковой томограф А1040М полигон. – Режим доступа: <http://www.ncontrol.ru/catalog/Ultrazvukovoj-kontrol/Ultrazvukovye-defektoskopy/Ui-trazvukovoj-tomograf-A1040M-POLIGON> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус\_(дата обращения: 02.07.14)
9. Недавий О.И., Смокотин А.В., Протасова И.Б., Богатырева М.М. Опыт применения эхо-импульсного метода при неразрушающем контроле бетона несущих конструкций // Вестник ТГАСУ–2015–№1– С. 140–147

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ С ДЛИННЫМ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ МОНИТОРАХ**

*Губарев Ф.А., Кленовский М.С.*  
Томский политехнический университет  
Институт оптики атмосферы СО РАН  
Институт электронной физики НАН Украины

В ряде задач неразрушающего контроля необходима визуализация процессов в условиях интенсивной фоновой засветки. Такие процессы протекают в зонах взаимодействия мощных потоков энергии с веществом (лазерная обработка материалов, газоразрядное напыление пленок, модификация поверхности воздействием электронных

пучков, облучение биотканей концентрированными потоками энергии), при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС), в плазме разрядов и т.д.

Одним из инструментов для наблюдения объектов и процессов в условиях интенсивной фоновой засветки являются лазерные мониторы на основе высокочастотных лазеров на парах меди или бромида меди [1–7]. Температуры объектов наблюдения с помощью таких систем могут превышать 40000 К [7]. Лазеры на парах металлов и усилители яркости на их основе излучают на двух длинах волн в видимой области спектра: 510,6 нм (зеленая) и 578,2 нм (желтая). Принцип действия лазерного монитора аналогичен работе лазерного проекционного микроскопа [8] и состоит в следующем: исследуемый объект подсвечивается собственным сверхизлучением усилителя яркости, отраженный от объекта наблюдения сигнал усиливается и проецируется на экран, либо на CCD матрицу цифровой камеры.

Основные варианты реализации моностатической схемы лазерного монитора приведены на рис. 1: *a* – короткофокусный объектив расположен в непосредственной близости к усилителю яркости (типовая схема), *б* – короткофокусный объектив расположен на удалении нескольких метров от усилителя яркости, *в* – длиннофокусный объектив расположен в непосредственной близости к усилителю яркости.

Особый интерес для наблюдения с использованием лазерных мониторов представляют объекты, удаленные от системы наблюдения на расстояние нескольких метров или десятков метров [9, 10]. На рис. 1, *б*, *в* приведены модификации типовой схемы лазерного монитора для наблюдения удаленных объектов в зависимости от взаимного расположения усилителя яркости, объектива и объекта наблюдения. Схема на рис. 1, *б* имеет очевидные ограничения, связанные с необходимостью расположения объектива в непосредственной близости к объекту наблюдения. Такая схема неприемлема при наблюдении процессов, имеющих высокую температуру или сопровождающихся вылетом продуктов горения. Кроме того, при удалении объектива от усилителя яркости уменьшается область зрения [11]. Таким образом, наиболее подходящим вариантом моностатической схемы (с одним усилителем яркости) для наблюдения удаленных объектов является схема на рис. 1, *в*.

На протяжении нескольких десятилетий с момента получения генерации на переходах атома меди усиленно ведутся исследования по улучшению энергетических параметров лазера (усилителя яркости), таких как мощность, энергия генерации, длительность импульса. При визуализации удаленных объектов с помощью лазерного монитора длительность импульса генерации может иметь принципиальное значение. Так при использовании моностатической схемы, экономически более выгодной по сравнению с бистатической схемой (схемой с двумя усилителями яркости), продолжительность существования инверсии ограничивает максимально возможное расстояние до объекта визуализации. В подобном применении продолжительность усиления имеет большее значение, нежели мощность излучения. Поэтому вполне приемлем компромисс увеличения длительности существования инверсии в ущерб мощности и энергии излучения.

На длительность импульса генерации лазера на парах меди (бромида меди) влияют как особенности активной среды, состав и соотношения компонент рабочей смеси, так и геометрия газоразрядной трубки (ГРТ), условия возбуждения, в частности форма импульса накачки. Типичная длительность импульса генерации лазера на парах меди составляет 20–40 нс [12, 13].

Об увеличении длительности генерации лазера на парах чистой меди в диапазоне от 20 до 60 нс при уменьшении напряжения накачки, давления буферного газа и частоты следования импульсов сообщается в работе [14]. Наибольшая длительность генерации достигалась при ЧСИ 1 кГц. В работе [15] увеличение длительности генерации от 60 до 80 нс было достигнуто в лазере на парах бромида меди при уменьшении напряжения на

высоковольтном выпрямителе. В работе [16] в лазере на парах меди при снижении ЧСИ в диапазоне от 2000 до 100 Гц отмечалось уширение импульса генерации до ~120 нс.

В работе [17] приведены оценки максимальной длительности генерации в лазерах на самоограниченных переходах. Согласно работе максимальная длительность генерации лазера на парах меди в самоограниченном режиме ограничивается 175 нс и 206 нс для переходов 510,6 и 578,2 нм, соответственно, при возбуждении прямоугольным импульсом.

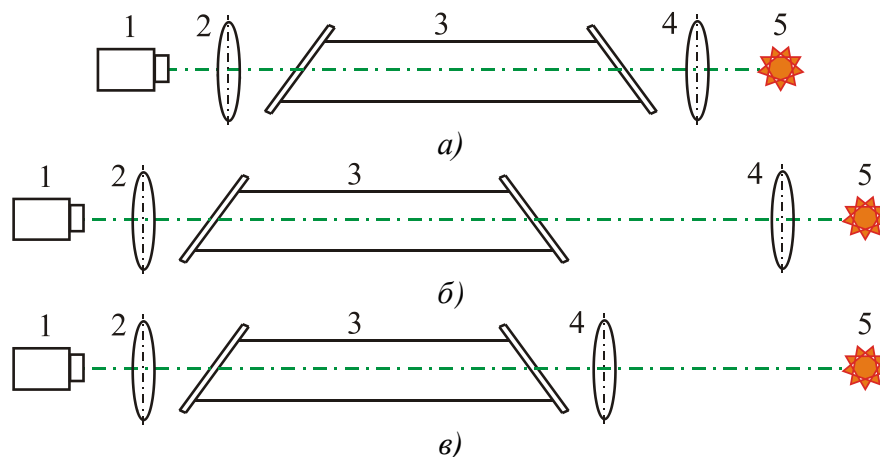


Рис. 1. Схемы лазерного монитора: 1 – камера; 2, 4 – объективы (в упрощенном варианте – линзы); 3 – усилитель яркости; 5 – объект наблюдения

В работах [18, 19] реализовано увеличение длительности генерации путем управляемого ограничения тока разряда, осуществляемого с помощью последовательного включения дополнительного таситрона в разрядный контур. Изменение длительности тока разряда позволяло регулировать длительность импульса генерации в пределах 3–200 нс [18] и получить максимальную до настоящего времени длительность импульса генерации в лазере на парах чистой меди 230 нс [19].

Аналогичная техника ограничения разрядного тока использовалась в работе [20] с лазером на парах бромида меди. При частоте следования импульсов (ЧСИ) 2,3 кГц получена длительность импульса генерации 320 нс.

Использование систем управляемого контроля тока разряда существенно усложняет и удорожает схему накачки лазера. Целью же данной работы является исследование влияния условий возбуждения CuVg-лазера на длительность импульсов генерации без применения дополнительных схем ограничения тока разряда.

В настоящей работе использовался CuVg лазер с внешним нагревом активной зоны, аналогичный использованным в [7, 21]. ГРТ длиной активной зоны 90 см и диаметром 5 см помещалась во внешний нагреватель для обеспечения одинакового температурного режима. Давление буферного газа неона в ГРТ составляло 30 торр. Накачка осуществлялась от тиратронного генератора (тиратрон ТГИ1-1000/25) с импульсным зарядом рабочей емкости [21]. ЧСИ варьировалась от 1,5 до 6 кГц. Величина накопительной емкости  $C$  составляла 1,65, 3,3 и 4,95 нФ.

Согласно проведенному анализу литературных источников, увеличение длительности импульса генерации может достигаться путем снижения частоты следования импульсов [14, 16]. Соответствующее исследование было проведено в настоящей работе. На рис. 2 приведены результаты исследования влияния ЧСИ на длительность генерации при различных величинах накопительной емкости  $C$ . Из зависимостей следует, что при снижении ЧСИ наибольшая длительность импульса генерации наблюдается при снижении ЧСИ возбуждения ниже 4 кГц. Однако при этом горение разряда ухудшается, особенно при меньшей накопительной емкости (меньшем энергокладе). Разряд контрагируется и меняет свое положение внутри ГРТ, изменяя область горения. С увеличением накопительной емкости разряд становится более

стабильным, наблюдается тенденция к увеличению длительности импульсов при снижении ЧСИ.

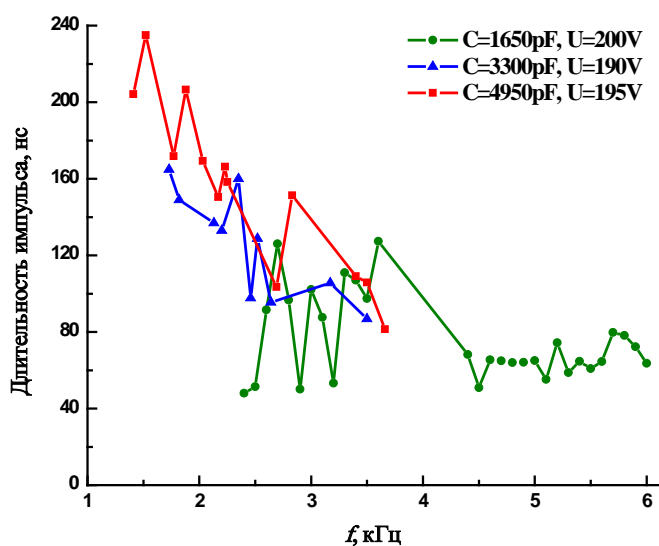


Рис. 2. Зависимости длительности импульса генерации от ЧСИ возбуждения разряда при различных емкостях накопительного конденсатора. Температура контейнера с порошком CuBr – 390°С.  $U$  – напряжение питания высоковольтного преобразователя

Следует отметить, что увеличенная длительность импульсов генерации не всегда приходится на каждый импульс возбуждения разряда. В пределах изменения условий возбуждения разряда увеличенная длительность импульса генерации наблюдалась с частотой в два раза меньше частоты следования импульсов возбуждения разряда, а порой увеличенная длительность импульса генерации приходилась на каждый третий импульс накачки.

По нашим предположениям, увеличение длительности импульсов генерации, возможно, обусловлено неоднородным горением разряда по объему (сечению) ГРТ, а именно, смещением области горения разряда в пределах сечения ГРТ в более холодную область, где условия для образования инверсной населенности более благоприятны.

На рис. 3 приведены фотографии профиля генерации, зарегистрированные ССД камерой FastCam HiSpec1 при длительности экспозиции 2 мкс. Поскольку длительность импульса генерации значительно меньше 2 мкс, камера регистрировала изображения, формируемые одиночными импульсами излучения. Изображения соответствуют различным длительностям импульса генерации. В случае, когда длительность генерации составляет 170 нс, генерация имеет более вытянутую форму вследствие большей нестабильности разряда.

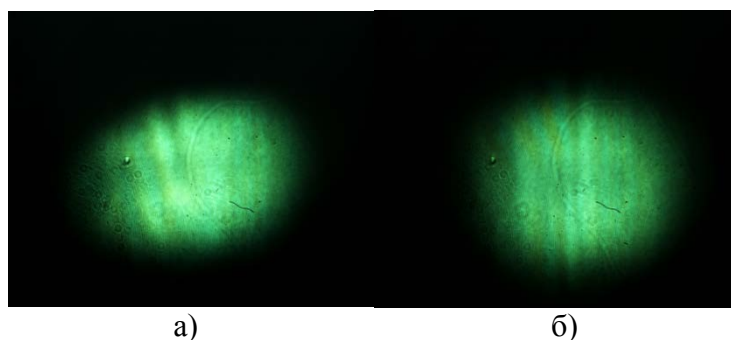


Рис. 3. Изображения пучка генерации, соответствующие длительности импульса генерации 170 нс, 2 кГц (а) и 100 нс, 2,6 кГц (б).  $C = 4,95$  нФ;  $U = 195$  В

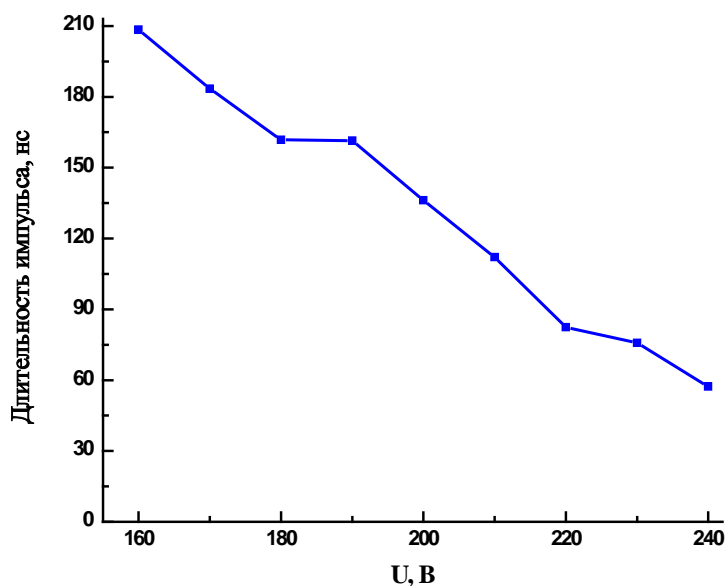


Рис. 4. Зависимость длительности импульса генерации от напряжения на выпрямителе.  
Температура контейнера с порошком CuBr – 360°C, ЧСИ 2,05 кГц,  $C = 3,3$  нФ

Как показано в работах [14, 15], увеличение длительности генерации происходит при снижении напряжения накачки. Подобный эффект наблюдался нами и в данной работе. На рис. 4 приведены зависимости длительности импульса генерации от напряжения на входе высоковольтного источника питания. Длительность импульса генерации возросла с 60 до 210 нс при снижении напряжения от 240 до 160 В, что соответствует снижению амплитуды импульса напряжения на электродах ГРТ с 14,2 до 9,4 кВ.

Таким образом, в работе обнаружено, что при переходе в неустойчивый режим горения разряда может наблюдаться генерация с увеличенной длительностью импульса. Показано, что получение импульсов генерации CuBr-лазера, длительностью до 235 нс по основанию (рис. 2), возможно и без применения дополнительных схем ограничения разрядного тока.

В то же время, для использования в качестве усилителя яркости в лазерном мониторе, пучок излучения должен иметь наиболее равномерное распределение интенсивности. Длительность импульса 100 нс (максимальная длительность генерации, полученная в данной работе и соответствующая устойчивой генерации) вполне достаточна для наблюдения объектов, удаленных от усилителя яркости на расстояние 15 м при работе в моностатической схеме лазерного монитора.

#### Список использованных источников

1. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения // Доклады АН СССР – 1988 – Т. 303 – № 4 – С. 857–860
2. 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
3. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савёлов А.С., Саранцев С.А., Терёхин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы – 2010 – Т. 36 – № 5 – С. 463–472

4. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображения // Контроль. Диагностика, специальный выпуск – 2011 – С. 140–143
5. Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы // Прикладная физика – №3 – 2009 – С. 96–98
6. Евтушенко Г.С., Тригуб М.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н., Шиянов Д.В. Макет лазерного монитора на основе активной среды CuBr-лазера для контроля и диагностики // Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 42–45
7. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyarov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Review of Scientific Instruments – 2014 – V. 85 – P. 033111-1–033111-5
8. Оптические системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991 (Труды ФИАН, Т. 206) – 152 с.
9. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya L.A., Slivitsky A.A. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // Fusion Engineering and Design – 2002 – V. 60 – P. 141–155
10. Buzhinskij O.I., Otroshchenko V.G., Slivitsky A.A., Slivitskaya I.A. Videoscope on the basis of copper vapor laser for spatially-temporal diagnostics of tokamak discharge chamber internal components // Plasma Devices and Operations – 2003 – V. 11 – No. 3 – P. 155–160
11. Fedorov K.V., Trigub M.V., Evtushenko G.S. Laser monitor for remote object visualization // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015, May 21-26, Omsk, Russia.
12. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов – Новосибирск: Наука– 1985 – 152 с.
13. 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 – 276 с.
14. Евтушенко Г.С., Кирилов А.Е., Кругляков В.Л., Полуниин Ю.П., Солдатов А.И., Филонова И.А. Управление длительностью генерации лазера на парах меди // Журнал прикладной спектроскопии – 1988 – Т.49 – С. 745-751
15. Юдин Н.А., Суханов В.Б., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С. О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов// Квантовая электроника – 2008 – Т. 38 – №1 – С. 23–28
16. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами // Квантовая электроника – 1983 – Т.10 – №5 – С.974-980
17. Бохан П.А. О длительности импульсов генерации лазеров на самоограниченных переходах // Квантовая электроника – 2011 – Т. 41 – № 2 – С. 110–114
18. Солдатов А.Н. Физика и техника лазеров на парах меди с управляемыми параметрами. // Оптика атмосферы и океана – 1993 – Т. 6 – № 6 – С. 650–658
19. Evtushenko G.S. Applications of pulsed metal vapour lasers in atmospheric optics // Pulsed Metal Vapor Lasers. Little C.E., Sabotinov N.V. (Eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht – 1996 – P. 445–452
20. Gubarev F.A., Fedorov K.V., Evtushenko G.S. Copper bromide laser with long lasing pulse // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices: IEEE proceedings– 2014 – P. 333–336
21. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт // Приборы и техника эксперимента – 2012 – № 5 – С. 696–700