

Ю.Н. Захаров, Ю.М. Сорокин

МИЛЛИСЕКУНДНАЯ КИНОГОЛОГРАФИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Реализована схема записи 4-кадровых мультиплексных голограмм коллективного оптического разряда (КОР) с использованием независимых оптических источников и радиотехнических линий задержки, работающая в широком временном интервале. Впервые зарегистрирован эффект распространения коллективного оптического разряда в аэрозоле, носящий скачкообразный («эстафетный») характер. Показано, что при эстафетном режиме развития время жизни КОР увеличивается за счет запаздывания эволюции вторичных ядер по отношению к первичному. На основе оригинального алгоритма, базирующегося на пороговой модели КОР, восстановлены профили температуры и электронной концентрации в разряде.

1. Введение

Коллективный оптический разряд (КОР) в сухой аэродисперсной среде при атмосферном давлении — явление в своих основных чертах довольно хорошо изученное. Построена пороговая модель КОР [1–3], согласованная с измеренными [2, 4, 5] значениями порогов пробоя. Динамика как изолированного микрофакела, так и ансамбля взаимодействующих микрофакелов на отдельных этапах разряда исследовалась в численном [6–8] и лабораторном [4, 9–14] эксперименте. Из имеющихся экспериментальных данных следует, что КОР в своем развитии повторяет лишь основные закономерности эволюции и невоспроизводим в деталях, поэтому по данным разных реализаций невозможно надежно восстановить динамику явления. Для решения этой задачи необходимо выполнить, с одной стороны, регистрацию последовательных мгновенных состояний объекта на всех основных стадиях его развития, а с другой — обеспечить восстановление пространственных характеристик КОР с заданной детализацией во всей области его существования. Однако расшифровка пространственных профилей основных физических параметров КОР была выполнена до настоящего времени лишь на основе теневого метода расфокусированных диафрагм [10, 12, 14], который, будучи по своей сути градиентным, хорошо выявляет фронты и плохо — структуру ядра разряда. Наиболее широкие возможности для получения информации о плотном высокоионизованном ядре КОР (в том числе по сравнению с простой интерферометрией [11]) предоставляют методы оптической киноголографии, обладающие высокой информативностью, точностью и помехозащищенностью. Однако известные схемы киноголографии (см. например, [15–17]) не перекрывают диапазона временных масштабов, необходимого для последовательного описания такого сравнительно долгоживущего объекта, каким является КОР.

Обычно в схемах киноголографии применяется один источник излучения, а для формирования последовательности кадров используются либо оптические линии задержки, выполняющие (при работе в моноимпульсном режиме) одновременно функцию пространственного разделения места записи отдельных кадров [15], либо сканирование в плоскости записи для разделения изображений, полученных от серии импульсов [16, 17]. В первом случае удается довести временной интервал между экспозициями до нескольких десятков наносекунд, во втором он реализован в диапазоне от 25 мкс до 1 мс, при этом ограничение на быстродействие в области малых задержек определяется наличием механических перемещений. Используемые в настоящее время для голографического кинематографа установки работают с частотой кадров до 20 Гц, т. е. с интервалом между кадрами 50 мс. Таким образом, для известных голографических систем оказываются недоступными временные интервалы между кадрами от 1 до 50 мс.

Запись нескольких изображений на одну голограмму при регистрации серии картин, представляющих собой временную последовательность состояний объекта, формирует мультиплексную (составную) киноголограмму. Возможность быстрого перехода от записи одного изображения к другому является преимуществом таких голограмм по сравнению с традиционными кинематографическими системами со сменой фотоматериала, поскольку малость механических перемещений в ходе записи или их полное отсутствие в зависимости от способа мультиплексирования практически снимают ограничение на быстродействие, связанное с требованием механической стабильности.

Можно неограниченно расширить диапазон временного стробирования, применяя несколько однотипных источников зондирующего излучения, включенных в общую голографическую схему. Результаты исследования структуры и динамики ядра КОР с помощью такой схемы на всем временном интервале существования высокоионизованной области и приведены в данной работе.

2. Методика эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источников используются четыре однотипных рубиновых квантрона 1–4 с собственными резонаторами и пассивными модуляторами

добротности. Заряд накопителей производится одновременно, а импульс поджига ламп накачки подается на каждую из головок через формирующую цепь на базе генераторов Г5–15 (см. 6–7, $\Delta t_1 - \Delta t_4$ на рис. 1), обрабатывающую необходимую временную задержку. В нашей схеме временные интервалы между экспозициями могут изменяться в диапазоне от единиц микросекунд до нескольких миллисекунд, что вполне достаточно для регистрации всех основных этапов развития КОР. Диапазон временных задержек может быть расширен при необходимости как в ту, так и в другую стороны сменой элементов формирующей радиотехнической цепи и составлять от единиц наносекунд до десятков секунд.

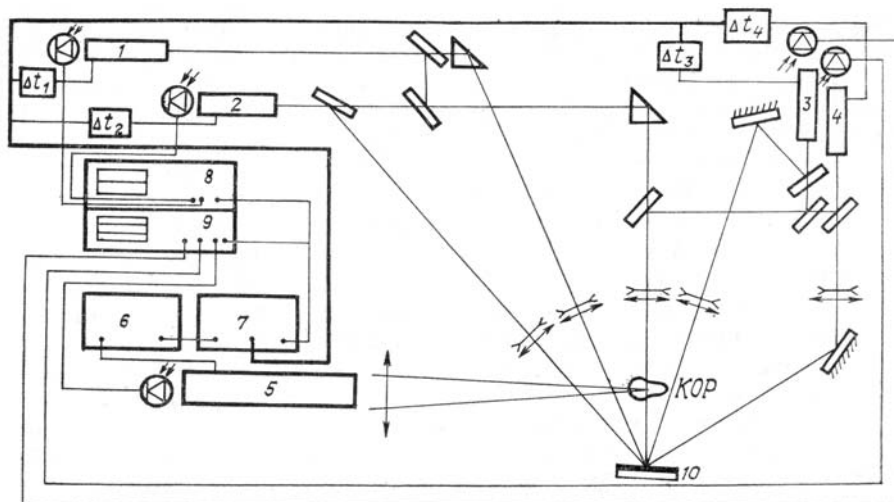


Рис. 1. Схема установки для записи мультиплексных голограмм КОР от независимых источников

Определенная нестабильность временных задержек, связанная с использованием пассивных модуляторов добротности, не мешала решению поставленной задачи. При повышении требований к точности временного стробирования (например, при исследовании структур типа длинной лазерной искры) необходимо применение активных модуляторов добротности.

Оптическую схему установки целесообразно построить таким образом, чтобы она не содержала перемещаемых в процессе съемки деталей, а значит не накладывала ограничений снизу на время между кадрами. Для этого часть излучения каждого источника сводится в один коллиматор и представляет собой предметный пучок, а другая часть формирует четыре опорных, каждый из которых образует свои углы схождения с предметным пучком. Поскольку при освещении голограммы 10, сформированной четырьмя парами пучков, восстанавливающей волной, совпадающей с одной из опорных, в восстановлении принимают участие четыре подголограммы, изображения всех кадров образуются одновременно и могут перекрываться, существенно ухудшая качество восстановленного изображения из-за интерференции между ними. Условия независимого восстановления изображений отдельных кадров основной киноголограммы с угловым кодированием опорных волн определяются геометрией схемы записи, легко рассчитываются и выражаются в том, что на достаточном удалении от голограммы информационный порядок не перекрывается с остальными вследствие разделения по углу от побочных изображений и осевого фонового шума. В созданной нами кинофотографической установке углы падения пучков на голограмму составляли: предметного $\alpha = 19^\circ$, опорных $\beta_1 = -17^\circ$, $\beta_2 = -36^\circ$, $\beta_3 = -6^\circ$, $\beta_4 = +32^\circ$. Углы дифракции восстановленного действительного изображения при этом равны $\alpha_1^* = 65,5^\circ$, $\alpha_2^* = 90^\circ$, $\alpha_3^* = 32,3^\circ$, $\alpha_4^* = -47,2^\circ$, мнимое же изображение восстанавливается по направлению распространения объектного пучка. В результате обеспечивается возможность как независимого восстановления любого кадра соответствующим пучком, так и интерференции любых двух из них (или более) при освещении двумя (или более) опорными пучками одновременно.

Иницирующий лазер 5 синхронизирован с кинофотографической установкой и запоминающими осциллографами 8, 9.

КОР в лабораторном воздухе с аэрозольными добавками обеспечивался в фокусе промышленного неодимового лазера 5 типа ГОС-1001 в режиме свободной генерации при усредненной интенсивности в фокальном пятне с размером 2–6 мм в пределах $I = 5 \cdot 10^5 - 10^6$ Вт/см² и длительности импульса $\tau_{\text{им}} \approx 1$ мс. Аэрозольный порошок карбида бора В₄С продувался через фокальный объем с помощью аэрозольного генератора (см. [10]), обеспечивающего стационарность статистических характеристик аэрозольного ансамбля (с концентрацией $n_a \approx 10^3$ см⁻³ и средним размером частиц $a \approx 100$ мкм), при ширине струи около 1 см. В результате область пересечения аэрозольной струи и фокального объема (со взаимно перпендикулярными осями и близкими поперечными размерами), где начинает формироваться ядро КОР, оказывается достаточно компактной и близкой к сферической. Это позволяет при ограниченной апертуре предметного и опорного пучков ($D \approx 5$ см) по восстанов-

ленным голограммам получить представление о динамике расширения КОР в различных направлениях. Зондирующие импульсы модулированной добротности на длине волны 694 нм имели длительность $\tau_{\text{п2}} = 40$ нс. Временные задержки $\Delta t_1 \div \Delta t_4$ выбирались таким образом, чтобы отразить наиболее существенные этапы развития КОР.

3. Качественные результаты

Восстановленные киноголограммы для одной из реализаций КОР приведены на рис. 2. Рис. 2, *a* визуализирует стадию формирования ядра КОР в процессе слияния микрофакелов, образовавшихся на отдельных аэрозольных частицах. Характерный «хвост» разряда связан главным образом со светореактивным выбросом аэрозоля по пучку (ср. [3]) и процессами взаимодействия системы паровых треков частиц с оптическим излучением (влияние ореола треков на распространение микроволнового излучения обсуждается в [18]).

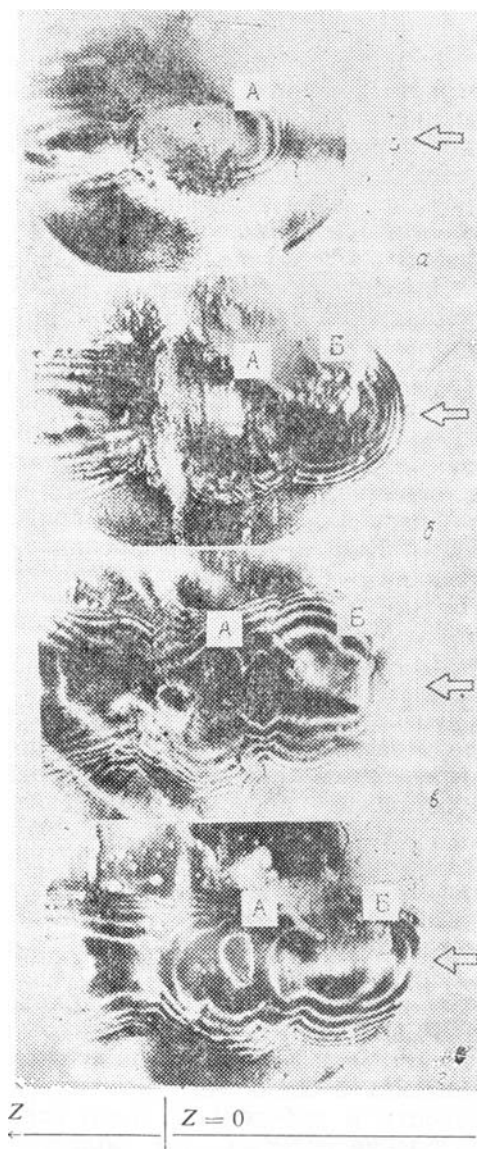


Рис. 2. Восстановленные голографические интерферограммы КОР в последовательные моменты времени: *a*—400; *б*—810; *в*—1040; *г*—1360 мкс. Ось аэрозольной струи проходит в плоскости $z = 0$ и совпадает с вертикальной осью поля зрения, стрелкой показано направление распространения инициирующего пучка. *A* — первичное, *Б* — вторичное ядро КОР

На рис. 2 впервые зарегистрирован новый механизм распространения сформировавшегося в некоторой области коллективного оптического разряда в аэрозольной среде. Действительно, как видно из сравнения рис. 2, *a* и 2, *б*, сформированное к моменту времени $t \gtrsim 400$ мкс первичное ядро КОР (рис. 2, *a*) при определенных условиях может параллельно с хорошо известным процессом непрерыв-

ного теплопроводного расширения породить вблизи своего переднего фронта вторичное ядро КОР, которое становится новым центром теплопроводного распространения разряда (рис. 2,б). Возникновение и развитие вторичного ядра КОР запаздывают по отношению к первичному, так что динамика разряда приобретает дискретный «эстафетный» характер: если на рис. 2,б первичное ядро КОР больше вторичного, то уже на рис. 2,в они имеют примерно одинаковые размеры, а на рис. 2,г вторичное ядро КОР является основным. Характерная скорость расширения ядер КОР составляет по данным рис. 2 $v \approx 15$ м/с, что соответствует упомянутому выше медленному теплопроводностному механизму. Эту же величину следует принять для оценки скорости распространения эстафеты в околопороговом режиме КОР.

Анизотропия «эстафеты» (распространение навстречу пучку) и причины ее возникновения кроются в особенностях физических условий формирования КОР. Как впервые указано в [19], наиболее эффективным является двухуровневый механизм коллективного оптического пробоя, когда на первом уровне отдельные плазменные очаги (ПО) возникают на сгустках (микроансамблях) аэрозольных частиц с локально повышенной (аномальной, сверхпороговой в смысле [2, 3]) концентрацией. При этом формирование области КОР идет на втором этапе в процессе смыкания таких ПО, получающих подкачку аэрозольными парами от испаряющегося аэрозоля с номинальной (средней, допороговой) концентрацией. «Эстафета» является по существу своеобразным видоизменением этого же процесса. Роль одного из ПО играет первичное ядро КОР. Первоначально изолированный от него микроансамбль с околопороговыми в смысле [2, 3] параметрами может породить запаздывающий ПО или их систему, перерастающую во вторичное ядро КОР в условиях подкачки паров от фонового аэрозоля и подкачки тепла от первичного ядра КОР. Ясно, что выполнение пороговых условий наиболее вероятно для микроансамблей, находящихся вдоль пучка, что объясняет анизотропию «эстафеты», распространяющейся навстречу пучку. В направлении по пучку «эстафета» подавляется светореактивным выбросом аэрозольных частиц со скоростями, большими теплопроводной.

Указанный механизм распространения КОР приводит к увеличению общего времени жизни разряда, как это видно из сравнения временных интервалов, относящихся к рис. 2, с данными работы [14], где по результатам теневой диагностики уже на временах $t > 0,5$ мс начинается процесс релаксации КОР. Аналогичные выводы следуют из сравнения рис. 3 и 4, где приведены результаты расшифровки голограмм КОР в различных реализациях, в одной из которых (соответствующей рис. 3) процесс распространения КОР был выражен более ярко.

4. Восстановление физических параметров КОР

Полученные в результате экспериментов голографические интерферограммы КОР (см., например, рис. 2) даже при условии цилиндрической симметрии объекта в плоскости обработки еще не позволяют восстановить профили физических параметров КОР. Для однозначного решения этой задачи необходимы дополнительные предположения, основанные на знании тех или иных физических особенностей развития объекта. Наиболее простое из подобных предположений, использованное в работе [10], основано на медленном теплопроводном механизме формирования КОР и сводится к изобаричности объекта на всех стадиях его развития в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР). Приближенное выполнение условий ЛТР в КОР вытекает из данных синхронной теневой диагностики на двух длинах волн [12]. Для выяснения пространственной структуры поля давления и оценки его величины в КОР с учетом молекулярной компоненты в работе [14] было использовано достаточно искусственное разбиение КОР на две области, в одной из которых (внутренней) аэрозольная компонента считалась полностью ионизованной, в другой (внешней) основной вклад в фазовые набеги давала нейтральная компонента.

Сложившаяся к настоящему времени количественная пороговая модель КОР [2, 3] позволяет предложить иной, физически более естественный, пространственно однородный алгоритм восстановления профилей таких физических характеристик КОР, как температура и электронная концентрация в условиях ЛТР, применимый в режиме «холодного слияния» [1]. В его основу положено то, что в околопороговых условиях температура, при которой происходит слияние микрофакелов, близка к температуре кипения T_k аэрозольного материала. Этого предположения недостаточно для восстановления профиля давления, но достаточно для оценки его величины в предположении лишь мгновенной изобаричности ядра КОР.

В соответствии с последним алгоритмом и велась обработка киноголограмм. Температура $T = T_k$ задавалась каждый раз на границе ядра КОР. Результаты обработки приведены на рис. 3, 4, где штриховые линии соответствуют температурному уровню $T \approx T_k \approx 4 \cdot 10^3$ К слияния микрофакелов. На рис. 3 приведены последовательные профили температуры и электронной концентрации вдоль оси аэрозольной струи при наличии эстафетного механизма распространения КОР (см. интерферограммы рис. 2), на рис. 4 восстановлены профили тех же физических параметров примерно в те же моменты времени в реализации, где «эстафетный» механизм отсутствует. Для реализации, соответствующей рис. 2, 3, получены следующие оценки давления в ядре КОР в последовательные моменты времени: $P_1 = 6,5$ атм, $P_2 = 8$ атм, $P_3 = 9$ атм, $P_4 = 11$ атм, что согласуется с данными теневой диагностики [14] и результатами численного моделирования [8]. Количественные различия отраженных на рис. 3, 4 температур-

ных режимов КОР и данных работы [14] (где максимальная температура превышает 10^4 К) совершенно естественны и обусловлены тем, что в настоящей работе, как уже отмечалось выше, исследуется околопороговый для КОР режим «холодного слияния», тогда как в [14] рассматривается динамика КОР в существенно сверхпороговых условиях.

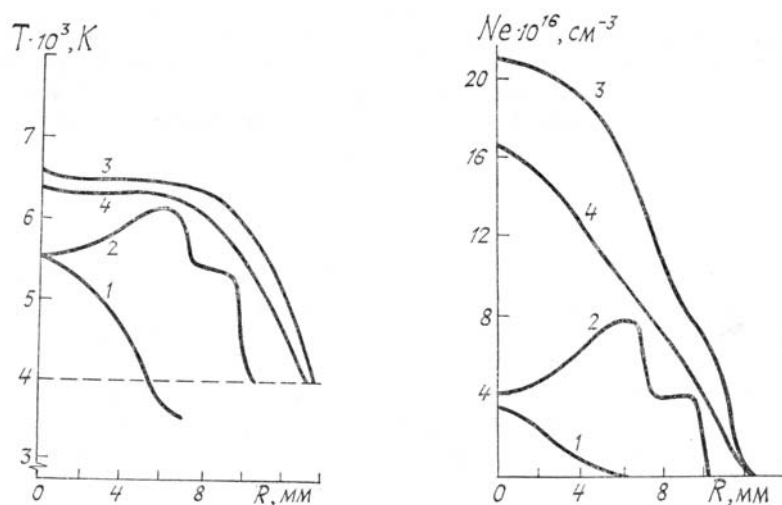


Рис. 3. Профили физических параметров КОР, соответствующие кинологограммам рис. 2: 1 – 400; 2 – 810; 3 – 1040; 4 – 1360 мкс

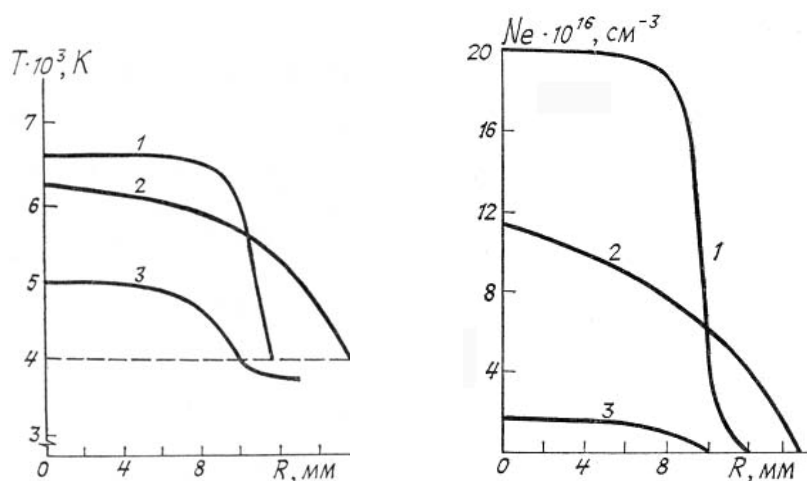


Рис. 4. Профили физических параметров КОР в отсутствие эстафетного механизма распространения разряда в последовательные моменты времени: 1 – 440; 2 – 800; 3 – 1200 мкс

5. Выводы

Для исследования пространственной структуры и динамики долгоживущих плазменных очагов типа области КОР эффективна запись мультиплексных голограмм без механических перемещений фотоматериала от независимых последовательно срабатывающих источников (принцип «митральезы»). При определенных условиях распространение КОР в аэрозоле может носить характер «эстафеты» последовательно возникающих ядер разряда, что приводит, в частности, к увеличению времени жизни всей плазменной области.

Последовательное использование пороговой модели КОР позволяет реализовать достаточно простой и эффективный алгоритм восстановления пространственных профилей температуры и электронной концентрации, а также оценить давление в разряде.

1. Сорокин Ю. М. //ЖТФ. 1986. Т. 56. № 7. С. 1431–1433.
2. Сорокин Ю. М., Королев И. Я., Крикунова Э. М. //Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 12. С. 2464–2473.
3. Сорокин Ю. М. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 8. С. 36.
4. Вдовин В. А., Захарченко С. В., Скрипкин А. М., Сорокин Ю. М. // В кн.: Труды Института экспериментальной метеорологии. М.: Гидрометеоздат. 1981. Вып. 26(99). С. 69–81.

5. Захарченко С.В., Скрипкин А.М. // Там же. С. 82–86.
6. Вдовин В.А., Сорокин Ю.М. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 7. С. 1449–1457.
7. Вдовин В.А., Сорокин Ю.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 10. С. 1220–1226.
8. Королев И.Я., Кособурд Т.П., Вдовин В.А., Сорокин Ю.М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. № 12. С. 2314–2323.
9. Захарченко С.В., Коломиец С.М., Скрипкин А.М. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. № 24. С. 1339–1343.
10. Королев И.Я., Кособурд Т.П., Крикунова Э.М., Сорокин Ю.М. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 8. С. 1547–1553.
11. Захарченко С.В., Скрипкин А.М. // В кн.: Труды Института экспериментальной метеорологии. М.: Гидрометеиздат. 1983. Вып. 31(105). С. 60–69.
12. Захаров Ю.Н., Кособурд Т.П., Сорокин Ю.М. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 5. С. 969–971.
13. Захарченко С.В., Семенов Л.П., Скрипкин А.В. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 12. С. 2487–2492.
14. Кособурд Т.П., Сорокин Ю.М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 7. С. 1318–1324.
15. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука. 1977. 336 с.
16. Hildebrand V.R., Haines K.A. // J. Opt. Soc. Amer. 1967. V. 57. № 2. С. 155–162.
17. Захаров Ю.Н., Менсов С.Н. // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 5. С. 992–995.
18. Королев И.Я., Сорокин Ю.М., Финкельштейн С.Е. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 7. С. 1360–1363.
19. Вдовин В.А., Захаров Ю.Н., Сорокин Ю.М. // В кн.: IV Всес. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. (Тезисы докл.). Обнинск – Барнаул. 1988. Т. 2. С. 141–143.

Горьковский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского

Поступила в редакцию
9 августа 1988 г.

Yu. N. Zakharov, Yu. M. Sorokin. **Millisecond Holography of the Collective Optical Discharge.**

The 4-sequense recording scheme of the collective optical discharge (COD) multiplexe holograms with the use of independent optical sources and radiotechnical delay lines is realized which operates in wide temporal interval. The effect of the COD propagation in an aerosols medium having a leap-wise (relay-race) character is first recorded. It is shown, that under the relay-race regime the COD life time increases due to delay of evolution of the secondary kernels with respect to the primery one. With the help of the original algorithm which is based on the COD threshold model the temperature and electrone concentration profiles in the COD are recieved.