

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕНЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИНАМИКИ НИЗКОПороГОВОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

*Г. П. Кособурд, Ю. М. Сорокин*

На основе теневого метода расфокусированных диафрагм изучена структура и динамика всех основных параметров низкорогового коллективного оптического разряда (НКОР) в аэрозольной среде. Предложенная методика обработки экспериментальных данных позволяет отказаться от использовавшегося ранее предположения об изобарности НКОР и исследовать газодинамические процессы в области разряда. Подтверждено существование и изучены особенности стадий «холодного слияния» микрофакелов, коллективного разогрева и теплопроводностного расширения разряда при интенсивностях, близких к пороговым.

### Введение

Контроль пространственной структуры и динамики нестационарных мало-размерных плазменных образований, создаваемых оптическим излучением в газодисперсной среде, является в настоящее время составным элементом любых экспериментальных работ по исследованию условий прохождения мощного лазерного излучения в реальной атмосфере, возможностей создания в ней проводящих каналов, мониторинга запыленности, лазерного спектрохимического анализа аэрозолей и т. п. Весьма удобными представляются для этих целей теневые методы визуализации фазовых неоднородностей. Их достоинства, связанные с простотой аппаратного обеспечения, методики выполнения и расшифровки пространственной структуры объекта хорошо известны [1]. Применительно к высокотемпературным частично ионизованным трехмерным объектам сложной формы, к которым относятся и области аэрозольного оптического пробы, им свойственны недостатки, присущие всем интерференционным методам и связанные главным образом с неоднозначностью расшифровки. Такая неоднозначность возникает на двух этапах обработки: 1) при восстановлении пространственного профиля показателя преломления  $\Delta n(r)$  по измеренным вдоль оси зондирующего пучка фазовым набегам, 2) при построении полей электрофизических и газодинамических параметров среды по восстановленному полю  $\Delta n(r)$ . В отсутствие достаточной априорной информации о симметрии объекта первый из этих недостатков в известной мере устраняется использованием методов многокурсного зондирования (ценой значительного усложнения как оптической схемы, так и методики обработки). Вопросы томографической диагностики составляют сейчас самостоятельную интенсивно развивающуюся область исследований и в данной работе не обсуждаются.

Для устранения неоднозначности на втором этапе расшифровки необходимо располагать информацией о физической природе и общих закономерностях развития объекта. В отношении низкорогового коллективного оптического разряда (НКОР) в плотных аэродисперсных системах такая информация обеспечивается результатами экспериментальных работ [2-6] и данными численного моделирования [5, 7-9]. Определенные расхождения между ними в настоящее время проявляются в том, что расшифровка пространственно-вре-

менной структуры физических параметров НКОР (таких как электронная концентрация и температура) выполнена лишь в изобарической модели (см. [2, 3]), тогда как последние результаты численного моделирования [9, 10] и экспериментальные данные [10, 11] указывают на важную роль газодинамических явлений на отдельных этапах развития НКОР, что проявляется, в частности, в генерации акустических возмущений [10, 11]. Исследованию газодинамических параметров области НКОР с помощью теневых методов и посвящена настоящая работа.

## 1. Схема установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. НКОР в лабораторном воздухе с аэрозольными добавками обеспечивался фокусировкой линзой 1 излучения промышленного Nd лазера типа ГОС-1001, работающего в режиме свободной генерации, с энергией  $W_x \sim 100 \div 200$  Дж при усредненной интенсивности в фокальном пятне с поперечным размером  $2R_0 = 5$  мм в пределах  $I = 5 \cdot 10^5 \div 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и длительности импульса  $\tau_{x1} \sim 1$  мс. Аэрозольный порошок карбида бора ( $B_4C$ ) продувался через фокальный объем с помощью аэрозоль-

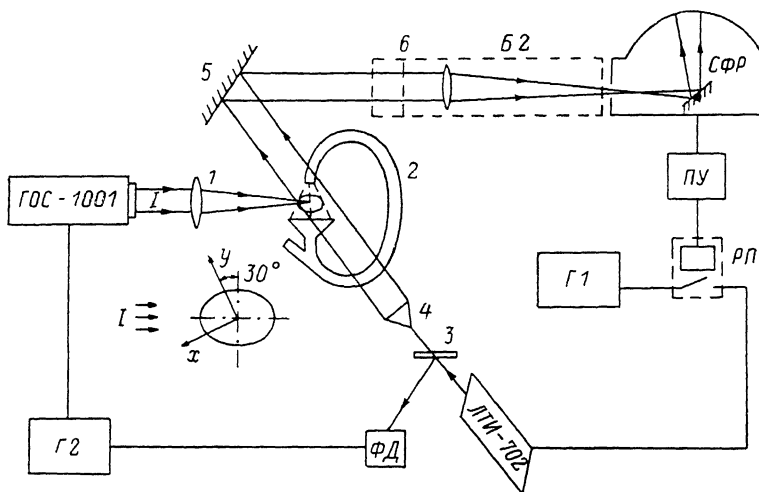


Рис. 1. Схема установки.

ного генератора 2, обеспечивающего стационарность концентрации ( $n_e \approx 3 \times 10^3$  см<sup>-3</sup>) крупномасштабной (со средним размером частиц  $a \approx 50$  мкм) дисперсной фазы. Выбор относительно крупномасштабной аэрозольной фракции с умеренной концентрацией позволяет снизить интенсивность, необходимую для поддержания режима развитого испарения аэрозоля, и «растянуть» во времени стадию формирования НКОР, согласовав ее временные масштабы с возможностями схемы зондирования и синхронизации.<sup>1</sup> Запуск схемы осуществлялся с пульта управления (ПУ) скоростного фоторегистратора (СФР). Сформированный необходимым образом синхроимпульс с СФР через одностабильное поляризованное реле РП включает цепь (задающий генератор Г1) внешней модуляции зондирующего лазера ЛТИ-702, работающего на длине волны  $\lambda = 503$  мкм с длительностью импульса  $\tau_{x2} \sim 1$  мкс при частоте повторения  $f = 10$  кГц, на время  $\Delta t_{РП} = 7$  мс, большее времени одной экспозиции фоторегистратора (2 мс), но меньше периода вращения его зеркала (16 мс). Тем самым предотвращается наложение тенеграм, полученных в последовательные моменты времени с интервалом  $T_1 = 100$  мкс. Первый из серии зондирующих импульсов через делительную пластинку 3, фотодиод ФД и задающий генератор Г2 запускает силовой лазер ГОС-1001.

<sup>1</sup> Увеличение временных масштабов процесса целесообразно также с точки зрения уменьшения влияния пиковой структуры импульса свободной генерации на динамику НКОР. Как показано в [3], общая картина эволюции микрофакала на частице радиусом  $a \sim 20$  мкм в околопороговом теплопроводностном режиме определяется средней по времени  $\Delta t \geq 10^{-5}$  с интенсивностью.

## 2. Методика визуализации фазового профиля НКОР

Диагностика НКОР проводилась теневым методом расфокусированных диафрагм [1, 12]. Расширенный коллиматором 4 зондирующий пучок после прохождения через область НКОР направлялся зеркалом 5 в теньевую схему 6, собранную на базе блока Б2 регистратора ТИБР (см. [13]). В качестве теневого экрана применялась амплитудная решетка с периодом  $\Lambda=1$  мм, установленная на расстоянии  $C=25$  см от исследуемой области. Ориентация штрихов решетки вдоль оси  $x$  (рис. 1) при использовании зондирующего пучка, перпендикулярного плоскости  $xy$ , позволяла определить профили фазовых набегов, а тем самым профили усредненного по лучу показателя преломления  $\Delta n(y)$  для выбранных сечений  $x=\text{const}$  и одновременно контролировать фазовый профиль объекта вдоль оси силового пучка. Отсчет координат  $x, y$  производился от центра фокальной области. Временная привязка тенеграмм обеспечивалась параллельной регистрацией на экран осциллографа последовательности зондирующих и силового импульса, от переднего фронта которого и производился отсчет времени.

Для расшифровки тенеграмм на первом этапе обработки (т. е. для построения профиля усредненного по лучу показателя преломления  $\Delta n(y)$ ) использовалась стандартная методика измерения градиентов фазы по сдвигу линий в дифракционном изображении расфокусированной диафрагмы в предположении сферической симметрии исследуемого объекта. Приближению к такой симметрии способствовали условия постановки эксперимента: для использованной конструкции аэрозольного генератора ширина струи аэрозоля существенно зависит от размера частиц и при выбранном значении оказывается порядка ширины фокальной перетяжки силового пучка. В результате область пересечения аэрозольной струи и фокального объема (со взаимно перпендикулярными осями), где и возникает НКОР, оказывается близкой к сферической. При обработке результатов экспериментов отбирались такие экспозиции, а на них сечения и участки, где симметрия объекта выявляется по виду тенеграмм. Максимальная абсолютная погрешность восстановления фазового профиля оценивалась исходя из того, что истинное значение фазового набега должно быть одинаковым по обе стороны от возмущенной области. Невязка, возникающая в результате накопления погрешностей определения фазы на всем рабочем интервале изменения  $y$  по указанной выше градиентной методике, составила 20 % от максимального значения фазового набега.

## 3. Условия однозначной расшифровки физических параметров НКОР

Для расшифровки пространственной структуры и динамики физически различных параметров НКОР использовались подтвержденная данными экспериментов пороговая модель коллективного разогрева (КР) [14, 15], а также результаты численного моделирования режимов развития аэрозольного плазменного микрофакела [7, 9] и области коллективного пробоя в целом [8].

Исследовались пространственные профили и динамика всех основных параметров НКОР: электронной концентрации  $N_e$ , температуры  $T$ , давления  $P$ , суммарной концентрации  $N$  атомов и ионов, а также скорости  $V$  расширения возмущенной области. С учетом достигнутого временного разрешения (100 мкс) это дает возможность построить последовательную и достаточно полную газодинамическую картину формирования НКОР в плотном аэрозольном ансамбле при интенсивностях, близких к пороговым.<sup>2</sup>

В пределах времени экспозиции фоторегистратора (2 мс) из рассмотрений исключались интервал формирования микрофакела, имеющий порядок  $\Delta t_{\text{мф}} \sim 10^{-5}$  с [6], и стадия развитой искры  $t > 0.7$  мс, где из-за сильной засветки для получения качественных тенеграмм необходимо использовать более мощный зондирующий источник. Стадия релаксации области НКОР вплоть до времен  $t \sim 1$  с исследовалась ранее в работах [2, 3, 6]. Некоторые режимы

<sup>2</sup> Измеренная по спектроскопическому критерию (появлению в спектре НКОР линий Ca II) пороговая интенсивность составила в наших условиях  $I \approx 5.6 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

формирования плазменного микрофакела моделировались численно в работах [9, 10].

Проанализируем далее предположения и упрощения, использованные на втором этапе расшифровки телеграмм для установления однозначной связи между величиной  $\Delta n$  и упомянутыми выше физическими параметрами области НКОР. Предположение о локальном термодинамическом равновесии в указанной области, позволяющее использовать формулу Саха, базируется на результатах численного моделирования как динамики изолированного микрофакела [7], так и коллективного режима пробоя [8], хорошо согласующихся с экспериментом [3, 5] при околопороговых для НКОР интенсивностях.

В соответствии с упомянутой выше моделью КР [14, 15] смыкание аэрозольных плазменных микрофакелов в околопороговом режиме НКОР идет при температуре, близкой к температуре кипения аэрозольного вещества ( $T_k = 4 \cdot 10^3$  K). На исследуемой стадии формирования и разогрева области НКОР ( $t \geq 0.3$  мс) температура повышается до величин  $T \leq 10^4$  K [3]. Ввиду сильной зависимости степени ионизации  $N_e/N$  от энергии ионизации вещества  $E_i$  и в соответствии с данными спектрального анализа НКОР при указанных условиях ионизацией воздуха (а также углеродной компоненты аэрозоля) можно пренебречь и считать, что концентрация электронов  $N_e$  определяется наиболее легко ионизируемой аэрозольной компонентой (в данном случае бором).

Результаты численного моделирования [7] и теоретического анализа пороговых закономерностей НКОР [14] показывают, что при интенсивностях, близких к пороговым, смыкание микрофакелов идет в изобарическом режиме (см. также экспериментальные данные [11]) в условиях сильного вытеснения буферного газа (воздуха) аэрозольными парами.<sup>3</sup> Заметный рост давления, сопровождающийся быстрым разогревом, происходит лишь на стадии формирования НКОР в условиях проявления коллективных эффектов. Сказанное позволяет выделить две различные, с точки зрения методики расшифровки, пространственно-временные области. В первой, «холодной», области, соответствующей стадии расширения и смыкания микрофакелов, а также пограничным областям развитого НКОР, давление близко к атмосферному, а заметная ионизация паров отсутствует. Преломляющие свойства определяются здесь главным образом нейтральными парами аэрозоля.<sup>4</sup> Во второй, «горячей», области легко-ионизируемая компонента аэрозоля полностью ионизована, что с учетом сильного падения поляризуемости атома при ионизации и относительно малого содержания трудноионизируемой компоненты аэрозоля (углерода) позволяет считать, что основной вклад в  $\Delta n$  ( $y$ ) вносят электроны. Определение их концентрации  $N_e$  позволяет оценить локальную концентрацию ионизованной  $N_{V+}$  и нейтральной  $N_C$  компонент НКОР, а также величину давления

$$P = kT (N_e + N_{V+} + N_C). \quad (1)$$

Условие перехода от «холодной» к «горячей» модели поляризуемости связывалось с естественным масштабом  $\Delta n$ , определяемым максимально возможным вкладом вытесняемого из области НКОР холодного воздуха ( $\Delta n_B = 2\pi\beta N_0 \sim \sim 2.6 \cdot 10^{-4}$ ). Ясно, что при  $|\Delta n| > \Delta n_B$  фазовые набег заведомо определяются электронной компонентой.

#### 4. Обсуждение результатов

Результаты восстановления пространственно-временной структуры различных параметров НКОР отражены на рис. 2—4. Каждый рисунок содержит два семейства кривых. Первое семейство (сплошные линии) показывает профили

<sup>3</sup> Более детальный газодинамический расчет показывает, что зоны неизобаричности вблизи поверхности частицы имеют размеры порядка  $a$  и, таким образом, не вносят существенного вклада в величину фазового набег.

<sup>4</sup> Подобная модель теряет силу при существенном повышении интенсивности ( $I \geq 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>), например, для разряда типа длинной лазерной искры [16], где экспериментально зарегистрированы ударные волны, формирующиеся непосредственно на аэрозольных микрофакелах [17]. К этому же выводу приводят и результаты численного моделирования [9].

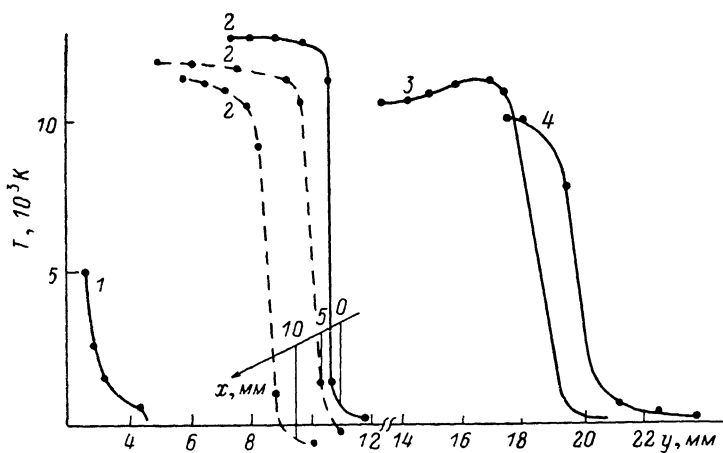


Рис. 2. Пространственные профили температуры в области НКОР в последовательные моменты времени: 300 (1), 500 (2), 600 (3), 700 мкс (4).

Сплошные кривые — в сечении  $x=0$ , штриховые — в сечениях  $x=0.5$  и  $1$  см.

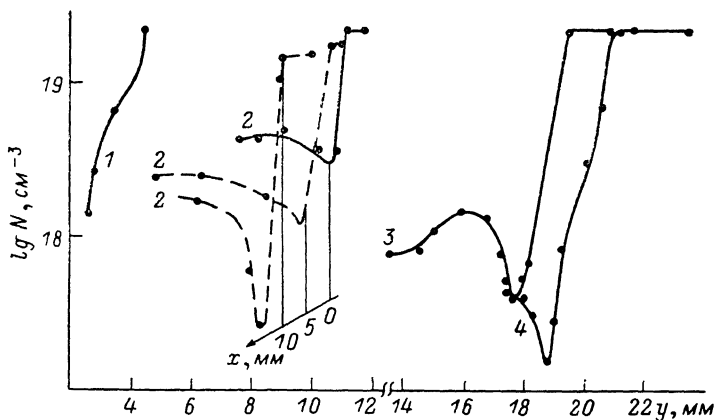


Рис. 3. Пространственные профили концентрации тяжелой атомно-ионной компоненты в области НКОР.

Обозначения те же, что и на рис. 2.

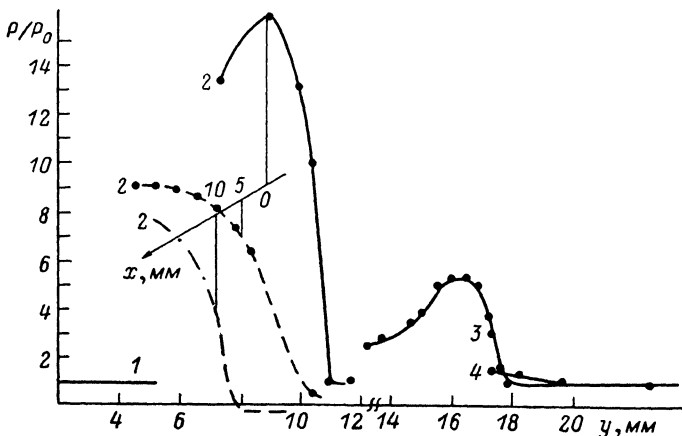


Рис. 4. Пространственные профили давления в области НКОР.

Обозначения те же, что и на рис. 2,  $P$  — атмосферное давление.

соответствующего параметра в последовательные моменты времени в сечении  $x=0$ . Кривые второго семейства (2) позволяют составить представление о пространственной структуре НКОР в момент времени  $t_2=500$  мкс в сечениях  $x=0, 5, 10$  мм. Как видно из рис. 2—4, восстановлению по методу расфокусированных диафрагм поддается не весь профиль параметра — использованная градиентная методика становится неэффективной в центральной области НКОР, характеризуемой большими фазовыми набегами и малыми их градиентами.<sup>5</sup>

Температурные профили (рис. 2) отражают последовательные этапы развития НКОР: 1) «холодное слияние» микрофакелов в пределах фокального объема при температурах порядка температуры кипения вещества аэрозоля ( $T \leq 5 \cdot 10^3$  К) за время  $t_c \leq t_1=300$  мкс, существенно превышающее длительность переднего фронта силового импульса ( $\Delta t \sim 100$  мкс); 2) коллективный разогрев разряда (за времена  $t_p \leq t_2-t_1=200$  мкс) до температуры  $T \sim 1.3 \cdot 10^4$  К, при которых идет эффективный отбор энергии из силового пучка за счет поглощения ионизованными парами аэрозоля и тем самым создаются условия для перехода к следующему этапу (кривые 2 на рис. 2); 3) теплопроводностное расширение разряда за пределы фокального объема, сопровождающееся относительно медленным уменьшением его максимальной температуры (см. также рис. 5) в условиях снижения мощности силового пучка (кривые 3, 4 на рис. 2).

Динамика электронной концентрации в области НКОР находится в согласии с известными экспериментальными результатами [2, 3, 6].

Полученные в соответствии с описанной в п. 3 моделью профили концентрации тяжелой (атомно-ионной) компоненты (рис. 3) наглядно иллюстрируют «эффект поршня» — вытеснения аэрозольными парами буферного газа из области формирования НКОР. При этом, как видно из сравнения рис. 2, 3, положение скачка концентрации тяжелой компоненты (рис. 3) совпадает с внешней границей прогретой (рис. 2) высокоионизованной области на этапе «холодного слияния» и коллективного разогрева и несколько опережает ее при переходе к этапу теплопроводностного расширения в релаксирующем разряде. Некоторые следствия этого процесса будут обсуждены ниже.

Закономерности формирования зоны повышенного давления в объеме НКОР (рис. 4) вытекают из рассмотренных выше зависимостей  $T(x, y, t)$ ,  $N_e(x, y, t)$ ,  $N(x, y, t)$  в соответствии с формулой (1). Поэтому отметим здесь лишь некоторые результаты, дополняющие общую картину развития НКОР в околопороговом режиме. Быстрый рост давления до величин  $P \leq 16$  атм, происходящий на этапе коллективного разогрева, сменяется столь же быстрым его падением на этапе теплопроводностного расширения, хотя максимальные температура и электронная концентрация меняются здесь еще незначительно (рис. 5). Естественно связать указанное обстоятельство с опережающим вытеснением тяжелой компоненты из области НКОР. Таким образом, аэрозольный «поршень» работает на этом этапе почти изотермически.

Приведенные выше результаты позволяют установить соответствие между изобарической и газодинамической моделями НКОР, отражающими различные стороны этого явления. Малоисследованной остается самосогласованная динамика формирования микрофакела на начальном этапе, доступная в настоящее время лишь численному моделированию с учетом кинетики испарения в причастичном слое.

Авторы признательны И. Я. Королеву за отладку схемы синхронизации и помощь в проведении эксперимента.

<sup>5</sup> В этой области предпочтительными оказываются методы голографической интерферометрии.

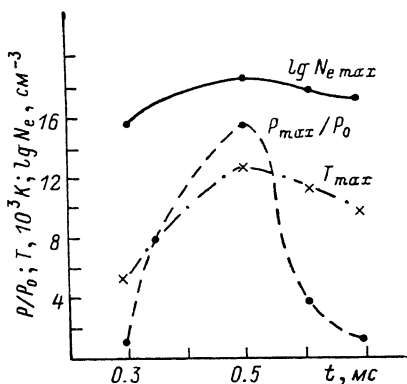


Рис. 5. Динамика экстремальных значений основных характеристик в области НКОР.

## Литература

- [1] *Васильев Л. А.* Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
- [2] *Захаров Ю. Н., Кособурд Т. П., Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1984, т. 54, № 5, с. 969—971.
- [3] *Королев И. Я., Кособурд Т. П., Крикунова Э. М., Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1983, т. 53, № 8, с. 1547—1553.
- [4] *Захарченко С. В., Коломиец С. М., Скрипкин А. М.* Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, № 24, с. 1339—1343.
- [5] *Вдовин В. А., Захарченко С. В., Скрипкин А. М., Сорокин Ю. М.* Тр. Ин-та экспериментальной метеорологии. Оптика атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1981, в. 26 (99), с. 69—82.
- [6] *Захарченко С. В., Семенов Л. П., Скрипкин А. М.* Квант. электр., 1984, т. 11, № 12, с. 2487—2492.
- [7] *Вдовин В. А., Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1981, т. 51, № 7, с. 1449—1457.
- [8] *Вдовин В. А., Сорокин Ю. М.* Изв. вузов. Радиофизика, 1983, т. 26, № 10, с. 1220—1226.
- [9] *Вдовин В. А., Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 2, с. 319—325.
- [10] *Королев И. Я., Кособурд Т. П., Вдовин В. А., Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1987, т. 57, № 12, с. 2314—2323.
- [11] *Букатый В. И., Коболов А. А., Тельнихин А. А.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 2, с. 312—318.
- [12] *Кособурд Т. П.* Опт. и спектр., 1985, т. 58, № 6, с. 1296—1299.
- [13] *Кособурд Т. П., Краснов В. А., Сорокин Ю. М.* Приборы и техника эксперимента, 1987, № 1, с. 185—186.
- [14] *Сорокин Ю. М.* ЖТФ, 1986, т. 56, № 7, с. 1431—1433.
- [15] *Сорокин Ю. М., Королев И. Я., Крикунова Э. М.* Квант. электр., 1986, т. 13, № 12, с. 2464—2473.
- [16] *Захарченко С. В., Синтюрин Г. А., Скрипкин А. М.* Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, № 17, с. 1065—1069.
- [17] *Кондрашов В. Н., Родионов Н. Б., Ситников С. Ф., Соколов В. И.* ЖТФ, 1986, т. 56, № 1, с. 89—96.

Горьковский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Поступило в Редакцию  
23 июня 1986 г.

В окончательной редакции  
18 марта 1987 г.