

*М.Ф. ЛАГУТИН, д-р техн. наук, А.А. ЗАРУДНЫЙ,
В.Л. БАСЕЦКИЙ, В.Г. ПЛЕТЕНЕВ*

ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Нами предлагается конструкция лазерной головки и система накачки лазера на красителе с использованием предионизационного импульса, а также система настройки длины волны излучения с использованием импульсного включения лампы с полым катодом (ЛПК). Исследования направлены на увеличение продолжительности работы излучателя, повышение его эффективности и точности настройки.

Одной из актуальных задач, непосредственно связанных с перспективой использования перестраиваемых лазеров на красителях для исследования атмосферы, является повышение их энергетической эффективности, т.е. энергии, спектральной яркости и к.п.д. При этом важное значение, с точки зрения отношения сигнала к фону, имеет обеспечение высокой средней мощности наряду с большой энергией в импульсе. При использовании немонохроматического возбуждения возможно применение источников накачки с высокими энергетическими параметрами, что позволяет возбуждать большие объемы красителя и получать энергию излучения вплоть до нескольких джоулей в полосе порядка единиц пикометров [1; 2]. Тем не менее известно сравнительно немного устройств, в которых высокие энергетические и спектральные характеристики сочетаются со значительным ресурсом работы. Проблемы получения высокого качества пучка и сложности достижения частотного режима работы в наиболее эффективных коаксиальных и других системах накачки "с плотной упаковкой" сдерживают их применение в качестве излучателей лидаров.

В работе представлены результаты исследований лазеров на красителях с накачкой прямолинейными лампами в эллиптических зеркальных осветителях. Разработанные лазеры успешно эксплуатировались в течение ряда лет на различных лидарных станциях [1].

Описание конструкции

Проблемы создания лазеров на красителях с некогерентной накачкой связаны в основном с крайне жесткими требованиями, предъявляемыми к лампам накачки. По этой причине разработки ведутся в направлении полу-

чения высоких энергетических характеристик излучения [3] либо достижения длительного ресурса работы [4]. Минимальное среднее значение времени жизни ламп определяется циклом зондирования атмосферы и обычно составляет величину порядка нескольких десятков тысяч вспышек. Уменьшение электрической энергии, подводимой к лампе, для дальнейшего увеличения ресурса работы приводит к снижению средней мощности излучения и сужению возможностей исследования динамики атмосферы. Применение ламп большой длины [3] улучшает характеристики разряда и увеличивает энергию и ресурс накачки, но за счет уменьшения светоотдачи при неизбежном снижении начального давления. Отличительной особенностью описываемой конструкции лазерной головки является возможность использования ламп с небольшой длиной разрядного промежутка (120 мм) при начальном давлении ксенона порядка 40 кПа. Это обеспечивает высокую эффективность накачки, а также возможность быстрой смены ламп для увеличения продолжительности сеанса зондирования без снижения энергетических характеристик лидара. С этой целью элементы крепления, жидкостного охлаждения, токопроводы и сама лампа объединены в конструктивный узел, который заменяется при выходе лампы из строя.

В основу разработки излучателя положено последовательное сочетание двух эллипсных цилиндрических зеркальных осветителей, развернутых под углом друг к другу и расположенных по длине кюветы с красителем [2]. Конструкция лазерной головки позволяет наращивать длину активного элемента с интервалом, равным размеру разрядного промежутка лампы-вспышки. Расстояние между лампами и кюветой с красителем равнялось 40 мм, эксцентриситет эллиптических осветителей — 0,6. Для эффективного отвода теплоты в частотном режиме предусмотрена прокачка охлаждающей жидкости через отверстия в отражателях.

Разработанная система накачки на прямолинейных лампах обладает рядом достоинств: высокая эффективность зеркального осветителя (около 0,6) сочетается с равномерностью накачки за счет разворота биэллиптических блоков относительно друг друга; при этом обеспечивается возможность быстрой замены лампы без разъюстировки резонатора; большая энергия в импульсе достигается посредством использования нескольких ламп; симметрия накачки и оптимальное разнесение в осветителе лампы и кюветы с красителем (40 мм) позволяют получить хорошие пространственные характеристики излучения; обеспечивается возможность получения коротких световых импульсов накачки за счет использования ламп небольшой длины без ограничения длины активного элемента; уменьшается эффект наведенной анизотропии раствора по сравнению с анизотропией аналогичных систем на основе длинных ламп — за счет разворота биэллип-

тических рефлекторов друг относительно друга. Последнее обстоятельство позволяет эффективно использовать в резонаторе дисперсионные элементы с пространственной селекцией.

В качестве ламп накачки применялись лампы типа ИСП-5000 (длина разрядного промежутка 120 мм, внутренний диаметр 7 мм) с начальным давлением ксенона 40 кПа. Кювета с красителем имеет внутренний диаметр 7 мм, внешний — 12 мм, они согласованы с диаметром разрядного промежутка лампы. Дальнейшее уменьшение диаметра кюветы с целью уменьшить расходимость пучка приводило к резкому снижению эффективности накачки. Окна кюветы были скошены по отношению к геометрической оси кюветы на угол примерно в 1° для предотвращения модуляции спектральной линии. В качестве хладагента использовалась дистиллированная вода, прокачиваемая центробежным насосом с подачей 20 л/мин. В системе прокачки раствора красителя применялся многослойный фильтр тонкой очистки с отверстиями диаметром 4 мкм. Скорость прокачки раствора достигала 15 л/мин.

Электрическая схема накачки

Для увеличения срока службы ламп-вспышек и повышения эффективности накачки реализуются различные варианты включения ламп: использование вспомогательного предимпульса, ионизирующего разрядный промежуток лампы до прихода основного импульса [5]; комбинация предимпульса с маломощным (около 10 мА) постоянным разрядом [6]; применение дежурной дуги с силой тока порядка нескольких ампер [7]. Первый вариант характеризуется максимальной эффективностью, последний — максимальной воспроизводимостью параметров излучения от вспышки к вспышке при меньшей эффективности, второй обладает промежуточными характеристиками. Основными недостатками режима с дежурной дугой являются большие энергетические затраты и повышенная деградация раствора из-за постоянной его засветки. Применение данного способа ионизации целесообразно при больших частотах повторения импульсов. Нами использовался предимпульс в сочетании с разрядом с большой постоянной времени (несколько сотен микросекунд), который был аналогом режима дежурной дуги с силой тока 5 ... 10 А.

При выборе схемы разрядного контура в многоламповой системе учитывалась необходимость синхронного поджига всех ламп, поскольку это непосредственно влияет на стабильность характеристик излучения. В результате анализа литературных данных и проведенных экспериментальных исследований был выбран один из вариантов схем разрядного контура с

общим коммутатором [7]. На рис. 1 представлена электрическая схема разрядных цепей накачки четырехлампового генератора. В общем случае предельное количество пар ламп определяется допустимой нагрузкой разрядника основной цепи.

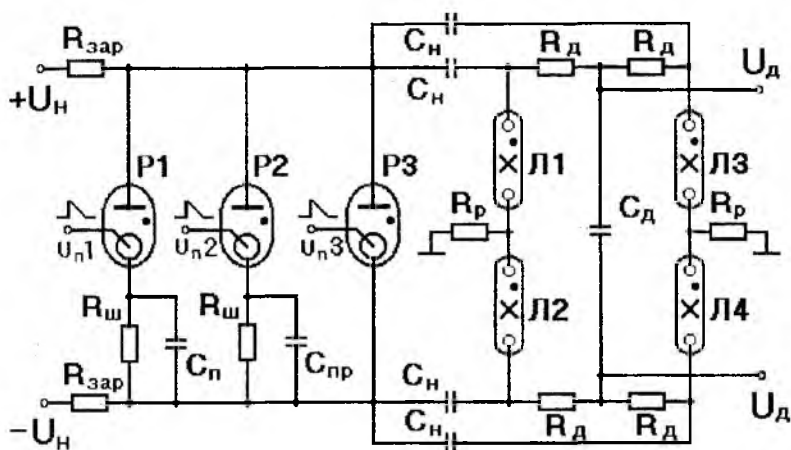


Рис. 1

Для улучшения характеристик светового импульса накачки и увеличения ресурса работы ламп использовалась модифицированная схема с предионизационным вспомогательным разрядом. Номинальные значения элементов цепи оптимизировались по максимальной энергии генерации спиртового раствора красителя родамин-6 ж. По сравнению со схемой параллельного включения ламп [7] в предложенном варианте уменьшена нагрузка на разрядник при неизменных временных параметрах разрядной цепи. К отличительным особенностям относятся также использование двухступенчатой схемы предимпульса и применение одних и тех же источников питания как для предионизации, так и для основного разряда. Подача первого предимпульса с постоянной времени около 500 мкс, определяемой резистором R_d и конденсатором C_d , является аналогом режима включения ламп с дежурной дугой. Номинальные значения элементов этой цепи устанавливались исходя из условий обеспечения режима сильноточной дуги и постоянной времени, достаточной для перехода разряда в квазистационарный режим после пробоя ламп при включении разрядника P1. Длительность переходного процесса (около 100 мкс), характеризующаяся

неравномерностью токов в лампах из-за их попарно-параллельного включения, определяется постоянной времени $RdCn/2$.

Импульс предионизации подается на лампы при замыкании разрядника P2 через интервал времени 150 мкс после включения разрядником P1 дежурной дуги. Использование схемы быстрой предионизации [5] в многоламповой системе накачки обусловлено возможностью обеспечить симметрию питания ламп благодаря отсутствию обратной связи по току через внутреннее сопротивление источника. Значение емкости $C_{пр}$ цепи предионизации и, следовательно, энергия предимпульса определялась экспериментально из условия получения максимального превышения энергии излучения лазера над исходным значением со схемой включения без предионизации. Для сохранения параметров разрядной цепи при возрастании количества пар ламп значения емкости C_n и $C_{пр}$ изменяются пропорционально. По сравнению с известными режимами включения ламп с предимпульсом [5] дежурной дугой [6], со слаботочной дежурной дугой и предимпульсом [7] данная схема более экономична и позволяет улучшить параметры и воспроизводимость световых импульсов. Энергетические затраты элементов цепи предионизации в расчете на одну лампу составляют около 5 Дж, что не превышает 10 % энергии основного импульса. Задержка между первым и вторым предимпульсами слабо влияла на эффективность накачки в пределах 100 ... 300 мкс. Задержка между вторым предимпульсом и основным разрядом, определяемая по максимальной выходной энергии в импульсе, напротив, была весьма критичной и поддерживалась с погрешностью до 2 мкс вблизи 36 мкс. Как известно, пространственное разрешение лидара напрямую зависит от длительности импульса излучения. Длительность импульса, в свою очередь, определяется емкостью конденсатора разрядной цепи, минимальное значение которой ограничено условием критического режима разряда. Поэтому применялись меры по уменьшению индуктивности разрядного контура. В схеме использовались малоиндуктивные конденсаторы и разрядник, соединение элементов производилось коаксиальными кабелями с волновым сопротивлением в несколько ом. Использование конструкции крепления ламп в качестве обратного токопровода позволило уменьшить общую индуктивность контура до 300 нГн. Характеристики разряда, близкие к критическим, имели место при уменьшении емкости конденсатора C_n до 2 мкФ. При этом длительности импульсов тока и светового импульса накачки равнялись соответственно 2,1 и 3,2 мкс. Длительность генерируемого импульса излучения лазера составляла 2,2 мкс (по уровню 0,5 от максимальной мощности), что соответствует пространственному разрешению по дальности 300 м.

При лидарных исследованиях атмосферы решающее значение имеет суммарная энергия излучения за время измерений. Экспериментальные исследования ламп-вспышек при оптимальных параметрах цепей предионизации показали, что наилучшие результаты для ламп типа ИСП-5000 достигаются при начальном давлении ксенона около 40 кПа.

Улучшение пусковых характеристик разрядников в схеме поджига обеспечивалось использованием высокочастотных тиристоров и тиратрона ТГИ100-8. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов тока в режимах включения ламп с предимпульсом (кривая 2) и без него (1), зарегистрированные запоями осциллографом с использованием пояса Роговского. Наблюдается существенное укорочение фронта и длительности импульсов наряду с возрастанием их амплитуды. Сравнение временных характеристик и амплитуд световых импульсов всех четырех ламп показало их практически полную идентичность и повторяемость. На рис. 3 представлены результаты ресурсных испытаний ламп в зависимости от энергетической нагрузки. В качестве критерия долговечности принималось снижение энергии излучения ламп на 20 % (1,5 дБ) или их разрушение. Результаты усреднялись по экспериментальным исследованиям ресурса работы десяти ламп и показали сравнительно слабую зависимость ресурса от схемы включения при одинаковой подводимой энергии. Выигрыш заключается в возможности уменьшения коэффициента нагрузки ламп при сохранении энергии излучения, о чем сказано ниже. Необходимо тем не менее отметить, что с применением предионизации (функция 2) время "жизни" ламп в основном определялось снижением прозрачности стенок, в то время как в режиме включения без предимпульса (1) ограничение ресурса в большинстве случаев происходило вследствие их разрушения. Практический интерес для лидарных исследований представляет диапазон ресурса ламп от $5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$ вспышек, что является в большинстве случаев достаточным при проведении циклов зондирования атмосферы. Дальнейшее увеличение времени жизни за счет снижения энергетической нагрузки сопровождается снижением энергии излучения лазера и большей относительной нестабильностью излучения вблизи порога генерации. Экспериментальные исследования позволили установить, что с применением предионизации ресурс ламп в этих пределах вполне удовлетворительно описывается выражением

$$N = \exp[16,1(1 - W / 246)],$$

где W — энергия, подводимая к лампе, Дж. Можно отметить, что система накачки, оптимизированная для лазера на красителе родамин-6 ж, близка к оптимальной для целого ряда красителей.

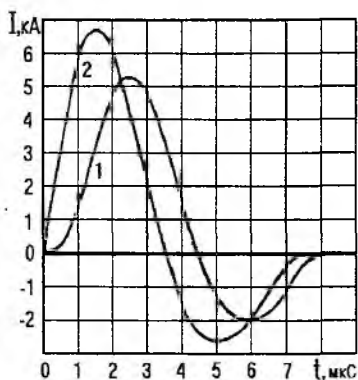


Рис. 2

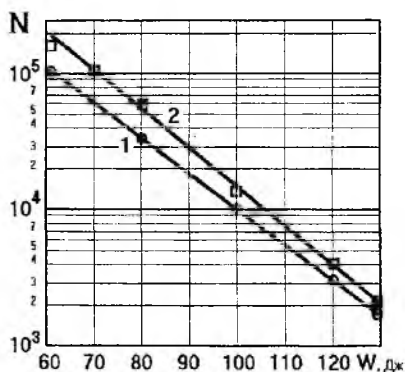


Рис. 3

Эффективность разработанной системы накачки подтверждается тем, что для шестилампового варианта излучателя в режиме с предионизацией в неселективном резонаторе длиной 0,6 м получена энергия излучения 5,5 Дж с расходимостью 6 мрад, а к.п.д. генерации по отношению к энергии, запасенной в разрядном контуре, достигал 9 %. Внутренний диаметр кюветы с красителем в этом случае был равен 10 мм, внешний — 16 мм. В качестве активной среды использовался этанольный раствор родамина-6ж ($9 \cdot 10^{-5}$ моль/л.) с добавкой циклооктатетроена (ЦОТ) (2 см³/л). Порог генерации наблюдался при подводимой энергии 50 Дж. Экспериментальные исследования показали, что при подводимой энергии лампе равной 90 Дж (к каждой лампе) ресурс работы составляет около $5 \cdot 10^4$ вспышек, что более чем на порядок превышает ресурс работы лазера в режиме без предионизации при подводимой к лампам энергии 115 Дж и с той же выходной энергией излучения. В селективном резонаторе с тремя внутрирезонаторными интерферометрами Фабри — Перо получена ширина спектральной линии 5 нм с энергией излучения в импульсе 0,4 Дж.

Настройка длины волны излучателя лазера

Преимущества лазеров на красителе в лидарах резонансного зондирования в полной мере реализуются только при наличии системы настройки длины волны и оценки ширины и формы спектральной линии излучения лазера.

В последнее время широко используется резонансный эффект изменения сопротивления в ЛПК при воздействии лазерного излучения. Было показано [8; 9], что это явление может быть использовано для настройки на требуемую длину волны излучения лазеров на красителях с помощью промышленных спектральных ламп.

Наибольшая чувствительность данного способа настройки достигается в импульсном режиме питания лампы. Схема импульсного включения лампы представлена на рис. 4. Здесь $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 = 390 \text{ кОм}$, $R_4 = 1 \text{ кОм}$, $C_2 = 0,02 \text{ мкФ}$. Высоковольтный транзистор работает в линейном режиме с постоянным коллекторным током, задаваемым базовым, который регулируется изменением напряжения на выходе импульсного генератора. Исследования показали, что оптимальная сила импульсного тока через лампу находится в пределах $200 \dots 700 \text{ мА}$ и выбирается в зависимости от конструкции лампы для получения наиболее стабильного режима работы. Резистор R_1 поддерживает относительно небольшую (1 мА) силу тока через лампу в отсутствие импульса. Резистор R_2 необходим для защиты от перегрузок по максимальному коллекторному току в импульсном режиме.

Для уменьшения уровня постоянной составляющей сигнала используется высокочастотный RC-фильтр с постоянной времени (20 мс) достаточной, чтобы не вызывать заметных искажений импульсов, индуцируемых лазерным излучением. В течение некоторого периода времени после начала импульса (30 мкс) в цепи происходит процесс, связанный с установлением квазистационарного режима работы лампы. Транзистор выходит из насыщения в начале импульса и в дальнейшем определяет силу тока через лампу. Длительность импульса зависит от времени установления квазистационарных процессов в лампе и обычно выбирается в диапазоне $70 \dots 90 \text{ мкс}$. Сигналы, индуцируемые лазерным излучением, могут быть легко обнаружены в любой момент второй половины импульса.

Импульсный режим включения ЛПК требует точной синхронизации момента включения лазера относительно импульса лампы. В свою очередь, момент начала действия импульса питания лампы должен быть согласован с работой механического затвора-обтюратора, перекрывающего фотокатод

ФЭУ приемного устройства лидача в течение времени действия лазерного излучения. Блок управления лазера вырабатывает импульсы, запускающие соответствующие исполнительные устройства поджига вспомогательного и основного импульсов накачки, а также синхронизирует работу устройства, управляющего режимом питания лампы с полым катодом. Импульс синхронизации с механического обтюратора (Обт.) запускает общую регулируемую линию задержки ЛЗ-1, которая определяет момент перекрытия фотокаатода ФЭУ во время действия импульса лазера (рис. 5).

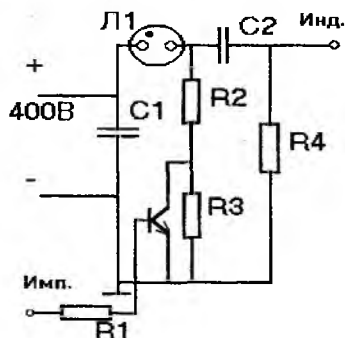


Рис. 4

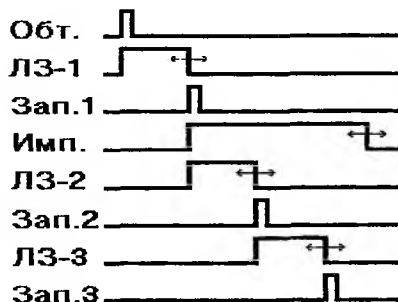


Рис. 5

По заднему фронту импульса задержки формируется импульс Зап. 1 для запуска регулируемого по длительности высоковольтного импульса на лампу (Имп). Одновременно с этим Зап. 1 запускает регулируемую линию задержки ЛЗ-2 вспомогательного импульса накачки лазера, по заднему фронту которой включается также регулируемая линия задержки основного импульса ЛЗ-3.

В разработанном синхрогенераторе имеется возможность независимой регулировки всех временных интервалов с дискретностью 6,67 мкс, соответствующей расстоянию по дальности 1 км. Лазер может запускаться Обт. в любой момент времени в течение периода импульса питания ЛЗ-1 лампы с полым катодом. Совпадение момента перекрытия Зап. 1 обтюратора фотокаатода ФЭУ и импульса излучения лазера Имп. регулируется общей линией задержки ЛЗ-1, которая может ЛЗ-2 компенсировать любое изменение временных интервалов на Зап. 2, соответствующее числу дискретных отсчетов. Таким образом, работа ЛЗ-3, фиксация временного интервала между импульсом Зап. 3 синхронизации обтюратора и вспышкой

лазера легко осуществима при любом изменении временных режимов работы устройства.

Преимуществами импульсного включения ламп являются значительное увеличение амплитуды импульса резонансного отклика и более чем двукратное сужение спектральной линии по сравнению с режимом непрерывного питания ЛПК. С помощью нейтральных светофильтров интенсивность излучения устанавливалась таким образом, чтобы не вызвать насыщающего уширения линий.

Настройка излучателя лазера на требуемую длину волны производится в два этапа. На этапе предварительной настройки используется линзовый спектроскоп с дифракционной решеткой 1200 штр./мм, работающий во втором порядке. С помощью угловой перестройки внутрирезонаторных дисперсионных элементов линия лазерного излучения совмещается визуально по матовому стеклу с выбранной линией свечения спектральной лампы, на которую настраивается лазер. Более точная настройка в разработанной системе осуществляется с использованием линейного прибора с зарядовой связью (ЛПЗС) в качестве оптико-электронного преобразователя, который устанавливается в фокальной плоскости спектрографа. Информация о положении спектральной линии после оцифровки сигналов ЛПЗС поступает на ЭВМ для последующей обработки, что позволяет контролировать длину волны лазера с погрешностью порядка 0,05 нм (ограничением является разрешение спектрографа). На втором этапе производится точная настройка на требуемую длину волны с использованием оптогальванического эффекта в ЛПК. Для достижения максимального эффекта часть лазерного излучения фокусировалось на катод лампы. Импульсы, индуцируемые лазерным излучением, после оцифровки поступают в ЭВМ для фильтрации флуктуаций амплитуды отклика, связанных с нестабильностью параметров излучения лазера и силы тока в ЛПК.

После появления отклика на выходе ЛПК настройка ведется с помощью шаговых двигателей, управляемых ЭВМ, до получения максимального отклика. Затем происходит перестройка лазера по длине волны с уменьшением амплитуды отклика до уровня половины максимального. Каждое значение амплитуды и соответствующая ему расстройка фиксируются в ЭВМ. По полученной настроечной кривой расчетным путем уточняется максимум настройки. Приведенная методика дает возможность настроить лазер с погрешностью 1 пм при ширине линии 5 пм.

Представленные конструкция лазерной головки и система накачки лазера на красителе позволяют значительно увеличить продолжительность непрерывной работы излучателя в составе лидара по сравнению с показателями существующих аналогов. В результате проведенных исследований и

оптимизации параметров разрядных цепей повышена эффективность многоламповых систем накачки. Использование ЛПК в импульсном режиме включения дает возможность повысить точность настройки длины волны излучения лазера для работы в составе резонансного лидара.

Список литературы: 1. Зарудный А.А., Мегель Ю.Е., Лагутин М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. 1988. № 6. С. 83 - 89. 2. Allain J.Y. High energy pulsed lasers for atmospheric sounding // Appl. Optics. 1979. V. 18, N 3. P. 287 - 289. 3. High-Energy dye laser pumped by wall-ablation lamps / T. Okada, K. Fujiwara, M. Maeda, Y. Migazoe // Appl. Phys. 1978. V. 15. P. 191 - 196. 4. Chu S., Smith R. Areliahl thyatron switched flashlamp-pumped dye laser // Optics Commun. 1979. V. 28, N 2. P. 221-226. 5. Comparison of coaxial and preionised linear flashlamps as pumping sources for high power repetitive pulsed dye lasers / A. Hirth, Th. Lasser, R. Meger, K. Schetter // Optics Commun. 1980. V. 34, N 2. P. 34. 6. Marotta A., Arguella C.A. A sinuered prepulsed flashlamp dye laser // J. Phys. E.: Sci. instrum. 1976. V 9. P. 478 - 481. 7. Лагутин М.Ф., Мустецов Н.П., Зарудный А.А. [Обзор] // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 2. С. 178. 8. Beenen G.J., Lessard B.P., Piepmeier E.H. [Review] // Analytic Chem. 1979. V. 51, N 11. P. 1721. 9. Beenen G.J., Hosch J.W., Piepmeier E.H. [Survey] // Appl. Spectr. 1981. V. 35, N 6. P. 593.

Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 14.04.97