

*М.И. ДЗЮБЕНКО, д-р физ.-мат. наук, В.П. ПЕЛИПЕНКО, канд. физ.-мат. наук,
И.В. КОЛЕНОВ, канд. физ.-мат. наук, Н.Ф. ДАХОВ*

ЛАЗЕР НА ЭРБИЕВОМ СТЕКЛЕ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Среди лазеров среднего инфракрасного диапазона длин волн особое внимание заслуживает лазер на трехвалентных ионах эрбия. Излучение эрбиевого лазера происходит в полуторамикронном диапазоне длин волн 1,5 – 1,6 мкм в зависимости от матрицы и попадает в относительно безопасную для зрения спектральную область [1 – 4]. Допустимая плотность энергии облучения роговицы глаза в этом спектральном диапазоне составляет примерно 0,8 Дж/см², что почти на пять порядков превышает соответствующие значения для видимой и микронной областей спектра [5]. Это обусловлено высоким коэффициентом поглощения полуторамикронного излучения, как самой роговицей, так и жидкостью, содержащейся в тканях между роговицей и светочувствительной сетчаткой оболочки глаза, что препятствует поражению последней излучением лазера. Высокий коэффициент поглощения тканей открывает широкие возможности применения эрбиевых лазеров для проведения тонких хирургических операций в офтальмологии [6, 7]. В этом спектральном участке имеется окно прозрачности в земной атмосфере, несмотря на наличие в ней воды в виде паров. Поэтому полуторамикронное излучение может быть эффективно использовано для целей локации и дальнометрии [8, 9]. Этому способствует и наличие весьма чувствительных неохлаждаемых германиевых и индий-арсенид-галлиевых (InGaAs) фотоприёмников. Кроме того, спектральная область 1,5 – 1,6 мкм совпадает с областью максимальной прозрачности кварцевых световодов, используемых в волоконно-оптических линиях связи.

Основным достоинством иттербий-эрбиевого стекла, как активной среды лазера, является большое время жизни возбужденного состояния трех валентных ионов эрбия (7 – 8 мс), высокая эффективность передачи энергии от ионов Yb³⁺ к ионам Er³⁺ и высокая оптическая однородность. Существенным недостатком Yb:Er стекол является трехуровневый характер работы лазера, малое сечение усиления эрбия и низкая теплопроводность, что ограничивает частоту следования импульсов накачки до нескольких герц.

Для накачки Yb:Er стекол могут применяться ламповая [10, 11] и диодная лазерная накачка [1 – 3]. В последнее время все более широкое распространение получила диодная накачка благодаря высокой эффективности возбуждения, большому ресурсу работы, малым тепловым потерям и компактности. В связи с этим, актуальным является разработка отечественного лазера на эрбиевом стекле с накачкой лазерными диодами для широкого круга применения.

Цель данной работы – разработка и изготовление экспериментального образца лазера на эрбиевом стекле с накачкой лазерными диодными линейками и обеспечивающего выходную энергию в несколько миллиджоулей в импульсах длительностью 20 – 30 нс при частоте их следования 0,5 – 1,0 герц.

Излучатель лазера

Возбуждение твердотельных лазеров излучением лазерных диодов, как известно, осуществляется по двум схемам: продольной и поперечной. При продольной накачке используется достаточно узкий и интенсивный пик поглощения иттербия на длине волны ~ 980 нм, что обуславливает необходимость термостабилизации полупроводникового диода. Ввод излучения накачки в резонатор производится через торец активного элемента, на который нанесено дихроичное зеркало. При этом обеспечивается наилучшее согласование мод накачки и генерации. Для получения больших мощностей генерации необходима большая мощность накачки, что в случае продольной накачки приводит, во-первых, к существенным термооптиче-

ским искажениям вдоль активного элемента и ухудшению оптических характеристик выходного излучения, а во-вторых – к быстрому разрушению элементов резонатора. Поперечная схема позволяет использовать большие мощности накачки, а размещение лазерных линеек вдоль активного элемента позволяет исключить возникновение температурного градиента в нем. При этом интенсивность возбуждения имеет равномерное распределение, а ее поверхностная плотность меньше чем в случае продольной накачки. Поперечная схема обеспечивает высокую надежность и простоту конструкции. В данной работе использовалась поперечная схема возбуждения лазера.

В качестве источника излучения накачки в работе использовались две 100-ваттные лазерные диодные линейки (ЛДЛ) длиной 10 мм каждая, установленные в линию. Длина волны генерации ЛДЛ составляла 933,3 нм, полуширина полосы излучения 2,2 нм при + 20°C. Величина рабочего импульсного тока составляла около 55 А, максимально допустимый ток – 110 А, падение напряжения на сдвоенной линейке составляло около 3 В. Длительность импульса тока 5000 мкс. Полный коэффициент полезного действия (КПД) достигал 60 %. Следует отметить, что линейки не имели дополнительных оптических элементов для формирования пространственных характеристик излучения.

Активным элементом лазера был цилиндрический стержень диаметром 2 мм и длиной 25 мм, изготовленный из фосфатного стекла, активированного ионами иттербия и эрбия. Концентрация ионов активаторов составляла $4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для Er^{3+} и $2,12 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для Yb^{3+} соответственно. Коэффициент поглощения Yb^{3+} на длине волны возбуждения 940 нм примерно равен $5,3 \text{ см}^{-1}$ (при сечении поглощения ионов иттербия $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$). Стержень имел плоскопараллельные торцевые поверхности с антиотражающими покрытиями на длине волны генерации 1,54 мкм. Схема диодной накачки эрбиевого лазера приведена на рис. 1. Активный элемент 1 размещался в сапфировом цилиндре 2, который имел внутренний диаметр 3,5 мм. Зазор между активным элементом и внутренней поверхностью сапфировой трубки заполнялся теплопроводящим компаундом. Для оптимизации ввода излучения накачки боковая поверхность сапфирового цилиндра была отшлифована таким образом, что в ней образовывалась щель шириной около 0,7 мм, через которую осуществлялся ввод излучения накачки от лазерных диодных линеек 4. Выбранная компоновка активного элемента и линеек возбуждения обеспечивает достаточно эффективный теплоотвод от активного элемента и минимизацию размеров излучателя. Внешняя поверхность сапфирового цилиндра имела отражающее покрытие 3, для возвращения в активный элемент излучения накачки, которое не было поглощено на первом проходе. Действительно, как показывают оценки, образец активного элемента, изготовленного из иттербий-эрбиевого стекла толщиной 2 мм поглощает за один проход около 65% излучения накачки. Поэтому, повысить эффективность накачки активного элемента можно, вернув не поглощенную часть излучения в объем активной среды с помощью отражающего покрытия. Лазерная диодная линейка располагалась на расстоянии примерно 0,5 мм от боковой поверхности активного элемента лазера, параллельно его оси.

Схема расположения элементов квантрона приведена на рис. 2. Оптический резонатор образован плоскими диэлектрическими зеркалами, находящимися на расстоянии 75 мм, между которыми размещался активный элемент 2. Коэффициент отражения глухого зеркала 1 на длине волны генерации составлял $R = 99,5\%$, а выходное зеркало 5 было частично прозрачное. Для реализации режима модуляции добротности в резонаторе между активным элементом и глухим зеркалом, размещался затвор 4 на основе насыщающегося поглотителя. Накачка активного элемента осуществлялась лазерными диодными линейками 3.

Энергия выходного излучения лазера измерялась калориметрическим измерителем типа ИМО-2Н. Временные параметры излучения регистрировались и анализировались Ge-фотодиодом с постоянной времени менее 3 нс и осциллографом DDA-125 (LeCroy) с полосой пропускания 1000 МГц. Внешний вид излучателя без верхней крышки представлен на рис. 3.

Результаты измерений и их обсуждение

Измерения основных энергетических и временных характеристик излучения эрбиевого лазера проводились в плоском резонаторе. Сначала было исследовано влияние добротности резонатора лазера на эффективность генерации. В частности, исследовалось влияние коэффициента отражения выходного зеркала резонатора на порог генерации и энергию лазера (использовались зеркала с коэффициентами отражения 75,2, 84,4, 90,0 и 95,4 % на длине волны 1,54 мкм).

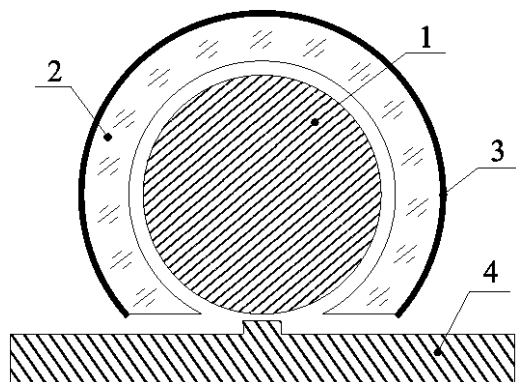


Рис. 1. Схема возбуждения иттербий-эрбиевого активного элемента лазерными диодными линейками

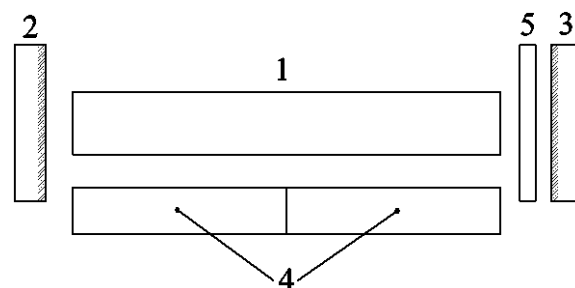


Рис. 2. Схема размещения элементов лазерного излучателя

Установлено, что для данного излучателя оптимальным по энергии генерации при почти двукратном превышении порога оказалось выходное зеркало с коэффициентом отражения около 84 %. Экспериментально было также установлено, что нанесение отражающего покрытия на внешнюю боковую поверхность сапфировой трубки приводит к уменьшению порога генерации почти в 1,2 раза.

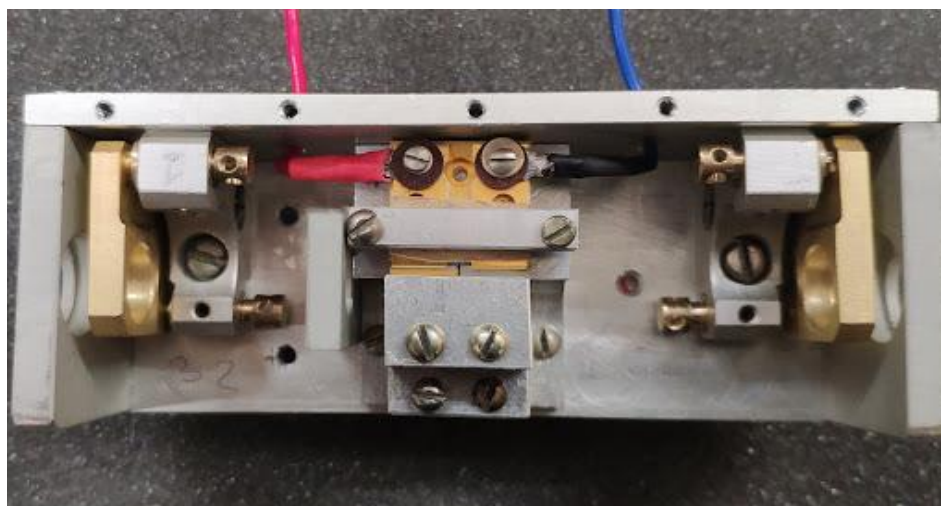


Рис. 3. Фото излучателя

На рис. 4 представлены осциллограммы импульса свободной генерации лазерного стекла (верхняя осциллограмма) и импульса накачки (нижняя осциллограмма), время развертки составляет 1000 мкс на одно деление. Как видно из рисунка, длительность импульса накачки составляет 4 мс, а длительность импульса генерации около 500 мкс. Видно, что в данной системе задержка лазерного импульса составляет около 3,7 мс по отношению к переднему фронту импульса накачки, то есть происходит в самом конце импульса накачки. Следует отметить, что при увеличении длительности импульсов накачки при сохранении величины тока длительность импульсов свободной генерации увеличивается. С увеличением тока при

сохранении длительности импульсов накачки задержка лазерного импульса по отношению к переднему фронту импульса накачки уменьшается.

Пороговая энергия накачки в нашей системе составляла около 790 мДж. Зависимость выходной энергии генерации от энергии накачки (тока диодной линейки) представлена на рис. 5. Она получена для случая, когда резонатор был образован сферическим ($F = 256$ см) и плоским зеркалами с коэффициентами отражения $R = 99,0\%$ и $R = 84,0\%$ соответственно. Видно, что зависимость носит практически линейный характер. При энергии накачки ~ 1150 мДж выходная энергия в режиме свободной генерации составляла около 27 мДж при длительности импульса ~ 550 мкс.

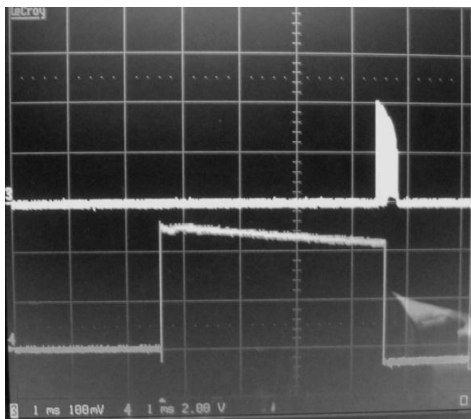


Рис. 4. Осциллограммы импульсов свободной генерации и накачки

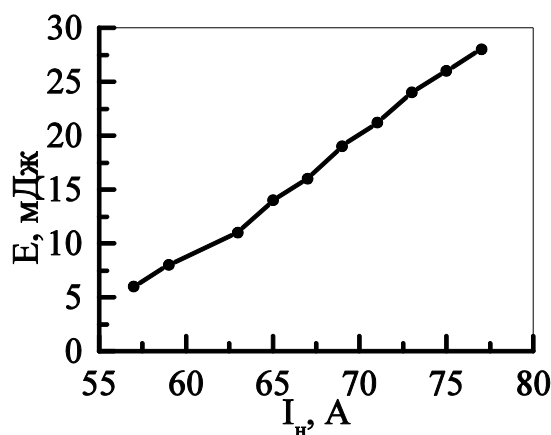


Рис. 5. Зависимость энергии генерации от тока накачки

На рис. 6 представлены импульсы свободной генерации лазера, полученные в плоском резонаторе при различных энергиях накачки. При энергии накачки близкой к пороговой (энергия возбуждения 690 мДж) наблюдается один импульс излучения с длительностью около 5 мкс (скорость развертки 10 мкс/дел), как показано на рис. 6, а. Увеличение энергии накачки относительно пороговой приводит к появлению второго импульса рис. 6, б (энергия возбуждения 705 мДж, скорость развертки 10 мкс/дел.), который находится на расстоянии

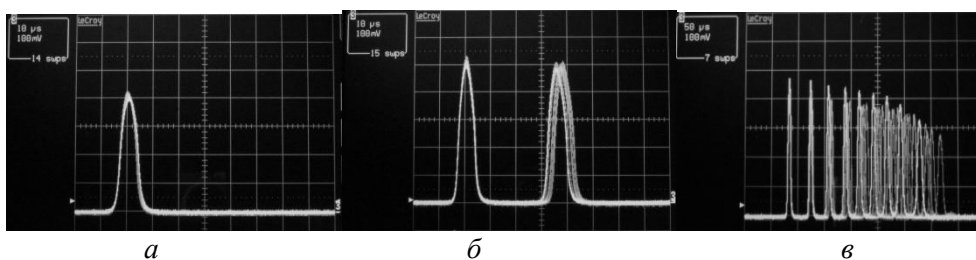


Рис. 6. Осциллограммы импульсов свободной генерации

около 35 мкс от первого импульса. Дальнейшее увеличение энергии накачки приводит к генерации периодической последовательности микросекундных импульсов с плавно уменьшающейся амплитудой рис. 6, в (энергия возбуждения 900 мДж, скорость развертки 50 мкс/дел.).

Периодическая последовательность импульсов в режиме свободной генерации может быть обусловлена самомодуляцией излучения. Действительно, лазер на ионах эрбия, как известно, работает по трех уровневой схеме. В этом случае спектр люминесценции эрбиевого стекла в полуторамикронной области практически повторяет спектр поглощения ионов эрбия [11]. Поэтому излучение эрбиевого лазера будет поглощаться в невозбужденной области активного элемента. В наших экспериментах накачиваемая область составляла 20 мм при общей длине активного элемента 25 мм. Ненакачиваемая область может выполнять роль

насыщающегося поглотителя (пассивного затвора [12]), что приводит к модуляции добротности резонатора и генерации импульсов.

Для получения гигантского импульса мы использовался пассивный модулятор добротности резонатора. Модулятор представлял собой плоскопараллельную пластину (параллельность $< 10''$, плоскостность: $\lambda/10$ на длине волны 633 нм) диаметром 6 мм и толщиной 1 мм, изготовленной из алюмо-магниевого шпинели с примесью ионов кобальта (Co^{2+} : MgAl_2O_4). Сечение поглощения из основного состояния алюмо-магниевого шпинели составляет $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ [13]. Исходное пропускание пассивного затвора, который применялся в работе, составляло $T = 87\%$. Обе поверхности затвора имели антиотражающие покрытия (коэффициент отражения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 1535\text{-}1550 \text{ нм}$ не превышал $R < 0,2\%$). Плотность энергии разрушения пассивного затвора составляет более 40 Дж/см^2 на длине волны 1550 нм при длительности импульсов облучения 20 нс.

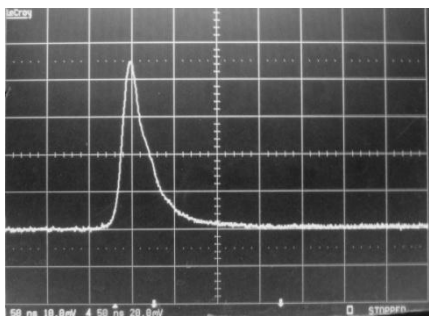


Рис. 7. Оциллограмма импульса генерации эрбиевого лазера с пассивным затвором

Моноимпульс генерации эрбиевого лазера с этим модулятором представлен на рис. 7. В режиме модулируемой добротности энергия генерируемого моноимпульса составляет 6 мДж при длительности импульса по полувысоте около 30 нс (скорость развертки составляет 50 мкс на одно деление). Структура поля излучения в режиме модулируемой добротности соответствует основной поперечной моде TEM_{00} . Расходимость излучения не превышает 5 мрад.

В наших экспериментах по изучению энергетических характеристик генерации эрбиевого лазера с пассивной модуляцией и накачкой лазерной диодной линейкой было установлено, что энергия моноимпульса не увеличивается при увеличении накачки. По мере

роста интенсивности накачки (увеличение импульсного тока при сохранении его длительности) сокращается время задержки моноимпульса по отношению к импульсу тока накачки. Как известно, для увеличения выходной энергии лазера необходимо увеличить объем возбужденной активной среды, а для сохранения высокого КПД сохранить при этом и оптимальную объемную плотность энергии накачки. Как показано в работе [14], при увеличении накачки увеличение возбужденного объема активной среды не происходит. Поперечный размер поля излучения в активной среде отвечает размеру низшей поперечной моды резонатора. Поэтому для достижения максимальной эффективности работы лазера необходимо добиться максимально возможного объема низшей поперечной моды путем изменения параметров резонатора, а выбирая расстояние между излучающими диодами накачки и активной средой [15] – обеспечить возбуждение этого объема с оптимальной для генерации плотностью.

Выводы

Разработан и изготовлен экспериментальный образец иттербий-эрбиевого лазера излучающего на относительно безопасной для зрения длине волны 1,54 мкм. Накачка активного элемента осуществлялась по поперечной схеме двумя лазерными диодными линейками мощностью до 100 Вт каждая, установленными в линию. Проведена оптимизация энергетических характеристик лазера в зависимости от добротности резонатора и условий возбуждения. Модуляция добротности резонатора производилась с помощью пассивного затвора на основе алюмо-магниевого шпинели с кобальтом. В режиме модулированной добротности получены моноимпульсы с энергией 6 мДж длительностью менее 30 нс при частоте следования один герц. Разработанный лазер будет использоваться в дальномере.

Список литературы:

1. Крылов А.А., Бученков В.А., Усков А.В. Компактный лазер, работающий с частотой следования импульсов 10 Гц в режиме модуляции добротности // Квантовая электроника. 2018. Т. 48, № 7. С. 607 – 610.
2. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Магдич Л.Н., Погонишев О.О., Садовский П.И., Семенов В.П. Малогабаритный эрбиевый лазерный излучатель с диодной накачкой и акустооптической модуляцией добротности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 5. С. 14 – 30.
3. Гагарский С.В., Галаган Б.И., Денкер Б.И. Карчагин., А.А., Осико В.В., Приходько К.В., Сверчков С.Е. Миниатюрные диодно-накачиваемые лазеры на иттербий-эрбиевых стеклах с модуляцией добротности оптическими затворами на нарушенном полном внутреннем отражении // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, № 1. С. 10 – 12.
4. Chen Y.J., Lin Y.F., Huang J., Gong X., Luo Z. and Huang Y. Enhanced performance of acousto-optic Q-switched Er:Yb:RAl₃(BO₃)₄ (R=Y and Lu) pulse lasers at 1580 nm // Laser Physics. 2013. № 9. P. 095801.
5. Рудницкий Ю.П., Шачкин Л.В., Залевский И.Д. О кинетике безызлучательного переноса энергии в фосфатных Yb-Er-стеклах, возбуждаемых диодным лазером // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 3. С. 197 – 201.
6. Федоров С.Н., Капаева В.Г., Андреев Ю.В., Богданова Э.Г., Беликов А.В. Техника лазерной экстракции катаракты // Офтальмохирургия. 1999. №1. С. 3 – 12.
7. Беликов А.В., Гагарский С.В., Губин А.Б., Вайнер С.Я., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н. Субжоульный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора для экстракции катаракты // Научн.-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, №6. С. 1021 – 1029.
8. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальномеры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С.59 – 65.
9. Mierczyk Z. Eye-safe laser systems // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4237. P. 177 – 188.
10. Dzyubenko M.I., Konrady V.A., Nickolaev Y.P., Shevchenko V.V. Investigation of energy parameters of laser using LPHS-E Cr-Yb-Er glass // Proceedings CAOL 2005 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. V.2., Yalta, Ukraine, 12-17 September. 2005. P. 63 – 66.
11. Dzyubenko M.I., Konrady V.A., Maslov V.V., Nikolaev Yu.P., Shevchenko V.V. Aluminium barium phosphate glass laser emitting at $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ // Functional Materials. 2008. V.15, No.3. P. 455 – 458.
12. Бородулин В.И. Резонансное поглощение излучения в неоднородной среде со знакопеременным коэффициентом поглощения // Оптика и спектроскопия. 1966. Т.20, № 4. С. 709 – 712.
13. Галаган Б.И., Годовикова Е.А., Денкер Б.И., Мейльман М.Л., Осико В.В., Сверчков С.Е. Эффективный просветляющийся фильтр на основе кристаллов MgAl₂O₄:Co²⁺ для модуляции добротности лазеров с $\lambda=1,54$ мкм на эрбиевом стекле // Квантовая электроника. 1999. Т. 26, № 3. С. 189 – 190.
14. Быков В.Н., Садовой А.Г. Эффективность лазера на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности резонатора // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 3. С. 202 – 204.
15. Быков В.Н., Изынцев А.А., Садовой А.Г., Садовский П.И., Сорокина О.А. Излучатель на эрбиевом стекле с поперечной полупроводниковой накачкой и пассивной модуляцией добротности // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 3. С. 209 – 212.

*Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усикова НАН Украины*

Поступила в редколлегию 10.11.2019