

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Б.Ю. Паршиков¹, Н.В. Прудников², Е.А. Леонова², Н.А. Соловьев²

¹ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт», ул. Гольяновская, д. 7а, стр. 1, Москва, Россия, 105094

²ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 6, г. Москва, Россия, 117342
E-mail: mzairan@mzairan.ru

В статье рассмотрены основные особенности взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом на примере фемтосекундных лазеров. Приведены новые эффекты, возникающие при таком взаимодействии, и перспективы практического применения суперинтенсивных лазерных импульсов. Рассмотрены недостатки существующих средств защиты оптико-электронных систем (ОЭС) наблюдения от возможного попадания лазерного излучения и пути создания новых микромеханических светоклапанных затворов с наносекундным быстро, исследованы возможности создания светоклапанного устройства защиты и варианты его конструкции.

Ключевые слова: оптико-электронные системы (ОЭС), лазеры, фемтосекундные импульсы, электроны, энергия, вещество, фотон, оптический затвор

STUDY OF THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH SUBSTANCE

B.Y. Parshikov¹, N.V. Prudnikov², E.A. Leonova², N.A. Solovyov²

¹Moscow Research Television Institute, Golyanovskaya str., 7A, Moscow, Russian Federation, 105094

²Interdepartmental Center for Analytic Research in Physics, Chemistry and Biology, Presidium RAS, Profsoyuznaya str., Moscow, Russian Federation, 117342
E-mail: mzairan@mzairan.ru

The article considers the main features of the interaction of intense laser radiation with matter using femtosecond lasers as an example. New effects arising from such interaction and prospects for the practical application of super-intense laser pulses are presented. Disadvantages of existing means of protecting optical-electronic systems (OES) from possible laser radiation penetration and ways of creating new micromechanical light-valve shutters with nanosecond speed are considered, possibilities of creating a light-valve protection device and its design options are investigated.

Keywords: optical-electronic systems (OES), lasers, femtosecond pulses, electrons, energy, substance, photon, optical shutter

Для цитирования:

Паршиков Б.Ю., Прудников Н.В., Леонова Е.А., Соловьев Н.А. Исследование вопросов взаимодействия лазерного излучения с веществом. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 1. С. 45–50. DOI: 10.6060/rcj.2025691.9.

For citation:

Parshikov B.Y., Prudnikov N.V., Leonova E.A., Solovyov N.A. Study of the interaction of laser radiation with substance. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 1. P. 45–50. DOI: 10.6060/rcj.2025691.9.

Открытие мощных источников лазерного излучения (ЛИ) привлекло внимание ученых и специалистов, в первую очередь военных, у нас в

стране и за рубежом, как возможность создания новых типов вооружения и военной техники. Такие свойства ЛИ как мгновенность распространения

(скорость света), способность переносить высокую мощность энергии на большие расстояния за счет когерентности и малой расходимости, отсутствие демаскирующих факторов, многообразие поражающих факторов и многократность использования излучателей расценивались как достаточное условие для создания лазерного оружия.

Такие замечательные свойства ЛИ в научных и производственных целях начали использоваться с отставанием по времени. Однако к настоящему времени перекося в исследованиях по созданию лазеров для военных целей и для решения научных и производственных задач ликвидирован и направления прогресса квантовой электроники основываются на дальнейшем совершенствовании характеристик ЛИ в части расширения области длин волн излучения, повышения стабильности частоты излучения, роста интенсивности импульсного излучения, повышения КПД, пространственной когерентности и т.д. [1].

Перспективными, с точки зрения повышения указанных характеристик ЛИ, являются газовые ИК-лазеры высокой и средней мощности; полупроводниковые лазеры (ППЛ) и, прежде всего, вертикальные и фазосинхронизованные ППЛ, ППЛ в голубой области, квантово-каскадные лазеры, матрицы (решетки) ППЛ, ППЛ на квантовых точках; твердотельные лазеры (ТТЛ) с накачкой ППЛ; фемтосекундные лазеры, обеспечивающие ультракороткие импульсы и ультравысокие интенсивности; рентгеновские и ВУФ-лазеры (область вакуумного ультрафиолета); ВУФ-экимерные лазеры; лазеры на свободных электронах [2].

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАТЕРИАЛАМИ

Новые эффекты взаимодействия лазерного излучения с веществом

Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с веществом изучается весьма интенсивно как для решения фундаментальных задач (лазерный термоядерный синтез), так и в прикладных оборонных задачах (поражение боеголовок и т.д.). Эти исследования проводятся с импульсами от наносекундной до миллисекундной длительности или непрерывным излучением. Происходящая фемтосекундная технологическая революция открывает совершенно новые возможности, основанные на эффектах суперинтенсивного светового поля ультракоротких импульсов и связанных с ними совершенно новых эффектов, таких как образование ультрабыстрых релятивистских электронов, жестких квантов рентгеновского излучения и

т.д. [3]. Для понимания прогресса в этом направлении на рис. 1. показаны (в масштабе 10-15 лет) этапы фемтосекундной инструментальной революции, ведущей к освоению более коротковолнового диапазона когерентного и некогерентного излучения (вплоть до генерации гамма-излучения) лазерными средствами.

Во-первых, с помощью мощных фемтосекундных световых импульсов можно получать ультракороткие *электронные импульсы* длительностью порядка 100 фемтосекунд чисто оптическим образом. В нашем распоряжении нет электронных способов управления за столь короткие времена. Более того, мощные фемтосекундные световые импульсы оказались полезными для управления в фемтосекундном масштабе времени электронами с большой энергией, которые используются в синхротронных источниках. Действительно, можно сильным световым полем получать и управлять пучком электронов, который испускает при прохождении ондулятора рентгеновское излучение. Этот прогресс достигается с помощью фемтосекундных лазеров в источниках некогерентного синхротронного излучения [8].

Например, в США и ФРГ ведутся проекты, в которых лазеры на свободных электронах с использованием фемтосекундных лазерных импульсов для управления электронными импульсами позволят получить когерентное излучение порядка единиц Ангстрем. Это будет исключительным достижением, когда релятивистские электронные пучки фемтосекундной длительности позволят иметь рентгеновские фемтосекундные импульсы высокой интенсивности с управляемой длиной волны, направления, фокусировки и т.д.

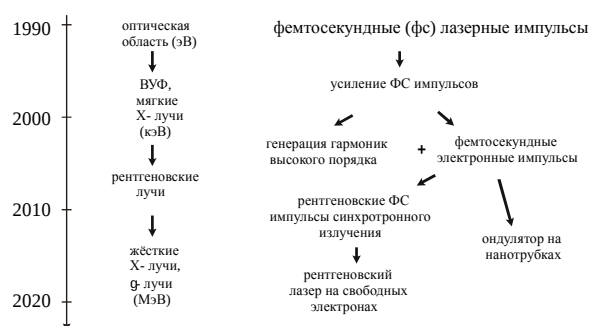


Рис. 1. Этапы фемтосекундной инструментальной революции

Рентгеновские фемтосекундные импульсы даже при умеренной энергии этих импульсов будут весьма существенны для исследования структуры вещества, конденсированных сред, поверхностей и т.д. Интенсивные направленные пучки излучения в

области несколько МэВ могут привести к созданию фотоселективной ядерной химии без использования нейтронных реакторов, т.е. к потенциально гораздо более безопасным методам трансмутации ядер, и, в принципе, дистанционной бесконтактной дезактивации ядерных боезарядов.

Особенности взаимодействия фемтосекундных ультраинтенсивных импульсов с веществом

Когда интенсивный лазерный свет взаимодействует с веществом, напряженность электромагнитного поля может намного превышать кулоновское внутриатомное поле, связывающее электроны в атомах. При интенсивности 10^{20} Вт/см² напряженность лазерного электрического поля составляет порядка 10^{11} В/см, что в 20 раз превышает электрическое поле, связывающее электроны в атоме водорода. При достаточно высокой плотности вещества лазерно-индуцированные фотоионизационные процессы создают плазму также весьма высокой плотности. Освободившись от ядер, электроны начинают осциллировать в поле лазера, набирая скорость, которая приближается к скорости света, т.е. начинают двигаться синхронно со световой волной. В этих условиях, действующая на электрон сила Лоренца за счет магнитной компоненты светового поля и высокой скорости движения электрона, обеспечивает его постоянное ускорение в осциллирующем поле в направлении движения светового импульса. В этом режиме за счет нелинейного Томсоновского рассеяния происходит генерация гармоник высокого порядка света, увеличение эффективной массы релятивистского электрона и, соответственно, изменение показателя преломления плазмы. Значительное изменение показателя преломления плазмы, в свою очередь, модифицирует распространение лазерного импульса, вызывая его самомодуляцию и релятивистское самоканалирование. При достаточно высокой плотности энергии возникает громадное давление света, и возникающая градиентная сила смещает электроны и ионы из области сильного поля. Образующееся электростатическое поле столь велико, что оно ускоряет электроны до релятивистских энергий в направлении распространения лазерного импульса, в результате чего, световое давление "прошивает" плотную нелинейную релятивистскую плазму.

При интенсивностях на уровне 10^{17} - 10^{23} Вт/см² взаимодействие лазерного света с веществом описывается уже законами релятивистской нелинейной оптики, как это видно на рис. 1 и 2,

на котором показана последовательность проявления всех этих принципиально новых нелинейных эффектов по мере увеличения интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов.

При исключительно высоких интенсивностях (рис. 2) возможен нелинейный процесс, который можно рассматривать как предел возможностей лазерной физики и техники высоких плотностей энергии и интенсивностей. Имеется в виду рождение пар «электрон-позитрон» в сильном световом поле не в веществе, а в вакууме.

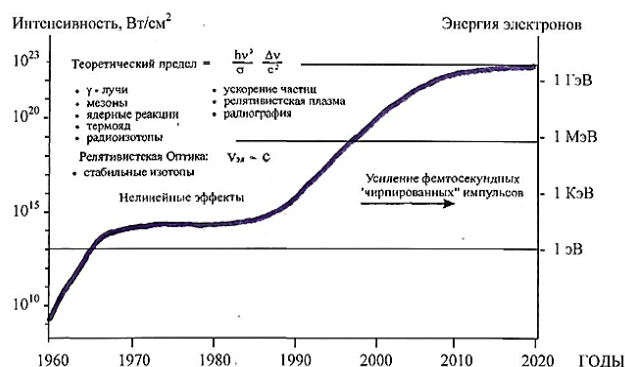


Рис. 2. Изменение интенсивности лазерного излучения и энергии электронов со временем

Для рождения пары частиц $e^+ + e^-$ необходимо, чтобы работа электрического поля по «раздвижению» противоположных зарядов e^+ и e^- на расстояние длины волны де Бройля электрона была достаточна для компенсации затрат энергии на рождение пары $2mc^2 \approx 1,02 \text{ МэВ}$. Плотность энергии такого светового поля составляет 10^{19} Дж/см³, и, следовательно, в соответствии с принципом эквивалентности энергии и массы, плотность «массы» такого светового поля достигает величины 10^5 г/см³, т.е. в 10^4 раз превышает плотность типичного металла. Принципиально такой плотности световой энергии можно достигнуть, сфокусировав фемтосекундный световой импульс с энергией в десятки кДж на площадь порядка 0,2 мкм. Этого нельзя исключить в течение 10...15 лет. Более того, именно использование эффекта концентрации световой энергии путем фокусировки когерентного светового поля в пустом пространстве является весьма принципиальным. В любых других методах электрическое поле создается на электродах, которые отдают свои электроны гораздо легче, чем они извлекаются из вакуума.

Можно уверенно прогнозировать, что направление лазерной физики и технологии, связанное с получением суперинтенсивных лазерных

импульсов, будет развиваться в предстоящее десятилетие весьма ускоренными темпами [4]. На первый взгляд может показаться, что эти исследования носят чисто фундаментальный характер и далеки от реальных технологий. В действительности, ситуация более многообещающая, так как происходит качественный скачок из области фотонов низкой энергии и высоких интенсивностей к области фотонов и частиц высокой энергии. Поэтому принципиально возможным становится развитие некоторых ядерных технологий на основе лазерных технологий без использования стартовых ядерных материалов, расщепляющихся под действием нейтронов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВЕТОКЛАПАННЫХ ЗАТВОРОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

Анализ существующих средств защиты ОЭС

В настоящее время – время массового применения и использования лазерных приборов и устройств, остро встает вопрос защиты оптико-электронных устройств, да и просто органов зрения, от возможного их поражения лазерным излучением [5].

Существующие средства не обеспечивают защиту оптико-электронных систем (ОЭС) наблюдения от возможного попадания лазерного излучения. А такое попадание лазерного излучения может приводить к разрушению фото- или теплочувствительного элемента прибора и, как следствие, к "ослеплению" и выводу из строя средства наблюдения. Проблема предотвращения ослепления не может эффективно решаться путем применения узкополосных отражающих светофильтров, или использования устройств, основанных на резонансном возбуждении атомов поглотителя (переводом на более высокие энергетические уровни), так как при этом требуется совпадение длины волны излучения средства подавления (как правило, неизвестна) и рабочей длины волны средства защиты. Кроме того, средство защиты не должно препятствовать ОЭС выполнить свою основную задачу – не потерять наблюдаемый объект [9].

Существующие средства защиты ОЭС недостаточно эффективны.

1. *Ячейка Керра* (электрооптический затвор) основана на использовании наведенного двулучепреломления и может обеспечить быстродействие до 0,1 нс, но требует знания направления по-

ляризации падающего светового излучения и применения электронных схем, срабатывающих от фотодатчика. Инерционность схем управления и случайность направления поляризации падающего светового излучения исключают возможность применения подобных устройств для защиты ОЭС, в том числе и любых устройств, управляемых с помощью сигнала от фотодатчика, пространственно отдаленного от затвора.

2. *Пленочные электрооптические затворы с фотопроводящим слоем, интегрированным в структуру затвора*, обладают недостаточным быстродействием (10^{-7} с) в связи с инерционностью фотополупроводников, а также, как и в случае с ячейкой Керра, модулируемый свет должен быть поляризован.

3. *Жидкокристаллические управляемые лазерным пучком пространственные модуляторы* обладают малым быстродействием (10^{-5} с).

4. *Использование фазовых переходов вещества при нагревании, сопровождающихся изменением оптических свойств*: оптические свойства изменяются в ограниченном спектральном диапазоне; амплитудная модуляция света недостаточна для затвора и т.п.

Анализ и других средств защиты ОЭС показывает их низкую эффективность. В этой связи актуальной является проработка принципиально новых путей решения проблемы повышения защищенности ОЭС.

Исследование возможности создания светоклапанного устройства защиты

В нашей стране в течение нескольких лет ведутся исследования по разработке микромеханических светоклапанных устройств с наносекундным временем срабатывания, которое обеспечивается приведением устройства в действие за счет использования энергии «ослепляющего» луча [6, 7]. Поглощение поверхностью светоклапанного устройства энергии падающего излучения приводит к возникновению множества деформационных микровыступов на отражающей зеркальной поверхности микромеханической структуры и рассеянию отраженного от этой поверхности излучения (рис. 3).

Время возникновения микровыступов должно составлять 0,1 ... 0,2 от длительности ослепляющего импульса излучения, при этом его доля энергии, рассеянной в широком телесном угле, составит 80...90% и будет отсечена апертурной диафрагмой, установленной по ходу луча в оптическом канале средства наблюдения.

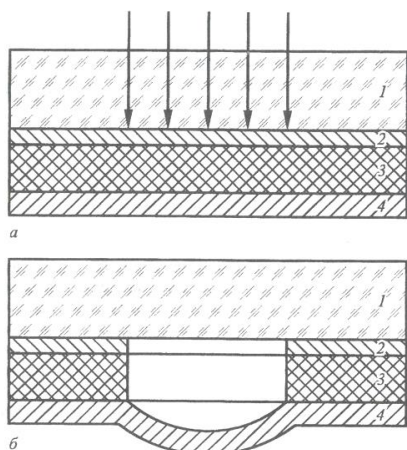


Рис. 3. Схема образования микровыступов в результате протекания термомеханических процессов в многослойных пленочных структурах на подложке

Эффект возникновения микровыступов имеет тепловой характер: поглощенное излучение нагревает газовую среду внутри микрокамер, расположенных под зеркальной поверхностью, до $1000...1300\text{ }^{\circ}\text{C}$; давление в них вырастает до $4...5\text{ атм.}$ за время порядка 1 нс . Это вызывает деформацию пленки над микрокамерой, создавая выступ высотой порядка сотых долей длины волны падающего лазерного излучения. Рассеивающий эффект наиболее значителен при расстояниях между микровыступами, примерно равных длине волны падающего излучения. Однако это условие не является обязательным.

Один из возможных вариантов технологии изготовления затвора предполагает использование технологических приемов кремниевых микросхем. На кремниевой плоской подложке фотолитографическим путем и избирательным травлением формируется массив микрокамер. Микрокамеры располагаются с шагом $1...2\text{ мкм}$ и имеют глубину $0,1...0,2\text{ мкм}$. Поверх массива наносят заранее подготовленную металлическую мембрану толщиной порядка $0,05\text{ мкм}$ и соединяют со стенками камер, образуя «крышки» камер. Готовый чип затвора должен быть помещен в корпус с оптическим окном, защищающим мембрану от механических повреждений.

Конструкция устройства светоклапанного зеркала

Пример оптической схемы устройства, использующего рассматриваемое микромеханическое светоклапанное зеркало, показан на рис. 4. Здесь изображена зеркально-линзовая оптическая

система с контррефлектором, используемая в современных ОЭС. Световой поток, идущий от цели и содержащий, в том числе, импульсы лазерного излучения, проходит прозрачный обтекатель 1, отражается сферическим зеркалом 2 на плоский контррефлектор 3 и далее проходит к приемнику 4. Зеркало 2 формирует на приемнике лучистой энергии 4 изображение цели. Контррефлектор выполнен в виде микромеханического светоклапанного зеркала. После окончания лазерного импульса ячейки остывают, и зеркало становится плоским. Время восстановления до 1 микросекунды . За это время при скорости $1\text{--}5$ скоростей звука аппарат переместится на расстояние $0,3\text{--}1,5\text{ мм}$, что не может привести к потере слежения за целью оптоэлектронной системой.

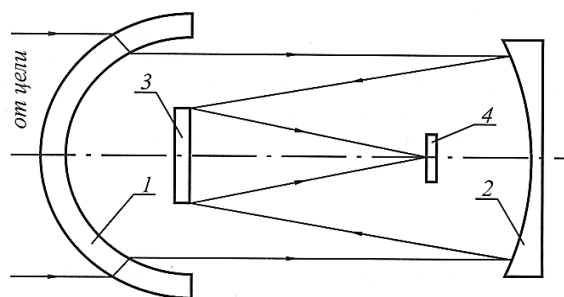


Рис. 4. Оптическая схема устройства микромеханического светоклапанного зеркала

Для одного из вариантов конструкции, с учетом конкретных размеров элементов светоклапанного зеркала, модельные расчеты, показали, что зеркало срабатывает за $\approx 1\text{ нс}$ при попадании на него лазерного импульса с длительностью 10 нс и пропускает излучение с плотностью энергии $150\text{--}300\text{ Дж/м}^2$. Если диаметр контррефлектора меньше диаметра сферического зеркала в N раз, то соответствующая плотность энергии от цели, падающей на обтекатель, при которой сработают световые клапаны, уменьшается пропорционально N^2 , т.е. при $N \approx 10$ она будет равна $15,0\text{--}30,0\text{ Дж/м}^2$. К приемнику 4 пройдет $0,1\text{--}0,2$ доли энергии излучения, падающего на световые клапаны. Световой клапан отсекает в данном примере 90% падающей энергии лазерного импульса, т.е. ослабляет плотность энергии, падающей на приемник, в 10 раз. При увеличении энергии ослепляющего импульса или при размещении светоклапанного зеркала в таком месте оптической схемы, где больше концентрации энергии, например, в области фокуса объектива, выигрыш только увеличивается, так как работа светового клапана имеет пороговый характер.

Полезная площадь микромеханического зеркала определяется использованной технологией изготовления его структуры. В случае применения планарной кремниевой технологии размер устройства ограничен поперечником кремниевых пластин (серийно изготавливаемые – до 100 мм.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные направления взаимодействия лазерного излучения с веществом, тенденции

и прогноз развития лазеров относятся к наиболее передовым и высокотехнологичным областям научно-технического прогресса, которые самым непосредственным образом влияют на состояние различных наукоемких технологий и определяют их дальнейшее развитие.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. План фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г. - М. Наука, 2006. -152 с.
2. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Под редакцией Мальцева П.П.-М. Техносфера, 2005. -590 с.
3. Лазеры ультракоротких импульсов и их применения. П.Г. Крюков. Издательский Дом ИНТЕЛЛЕКТ, 2012.
4. Воздействие мощных потоков энергии на вещество. Сборник трудов РАН. Под редакцией Форткова В.Е.-М. ИВТАН, 1992. -263 с.
5. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Программно-целевое планирование и управление созданием научно-технического задела для перспективного и нетрадиционного вооружения. - М. Граница, 2007. -407 с.
6. Чесноков В.В., Резникова Е.Ф., Чесноков Д.В. Лазерные наносекундные микротехнологии. - Новосибирск. СГГА, 2013. -300 с.
7. Прудников Н.В, Савельев М.А. Лазерные технологии, материалы и элементная база для микросистемной техники, Москва, 2020. -147 с.
8. Паршиков Б.Ю., Прудников Н.В., Леонова Е.А., Соловьев Н.А. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2024. Т. LXVIII. № 1. С. 18–24. DOI: 10.6060/RCJ.2024681.4.
9. Ведерников Ю.Н., Федотов С.А., Смирнов А.В., Авати-нян Г.А., Паршиков Ю.Г., Пономарев А.Н., Кулагин Ю.А. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2021. Т. 65. № 3. С. 25–32.

REFERENCES

1. Plan of Fundamental Research of the Russian Academy of Sciences for the period up to 2025. - M. Nauka, 2006, - 152 p.
2. Nano- and microsystems technology. From research to development. Under the editorship of Maltsev P.P.-M. Technosphere, 2005 – 590 p.
3. Ultrashort pulse lasers and their applications P.G. Kryukov. INTELLECT Publishing House, 2012.
4. Impact of powerful energy flows on matter. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Edited by Fortov V.E.-M. IVTAN, 1992-263 pp.
5. Burenok V.M., Ivlev A.A., Korchak V.Yu. Program-target planning and management of creation of scientific and technical reserve for perspective and non-traditional armament. - M. Granitsa, 2007, - 407 p.
6. Chesnokov V.V., Reznikova E.F., Chesnokov D.V. Laser nanosecond microtechnologies. - Novosibirsk. SGGA, 2013. 300 p.
7. Prudnikov N.V., Savelyev M.A. Laser technologies, materials and element base for microsystems technology, Moscow, 2020. - 147 p.
8. Parshikov B.Yu., Prudnikov N.V., Leonova E.A., Soloviev N.A. Ros. Khim. Zh. 2024. V. LXVIII. N 1. C. 18–24. DOI: 10.6060/RCJ.2024681.4.
9. Vedernikov Y.N., Fedotov S.A., Smirnov A.V., Avatinyan G.A., Parshikov Y.G., Ponomarev A.N., Kulagin Y.A. Ros. Khim. Zh. 2021. V. 65. N 3. P. 25–32.

Поступила в редакцию (Received) 08.02.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024