

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.373.8

СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

© 2023 г. В. Е. Роголин^а, *, К. М. Крымский^б

^а Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191186 Российская Федерация

^б Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

*E-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

После доработки 20.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Проведен обзорный анализ проблемных аспектов создания мощных наносекундных частотно-импульсных твердотельных лазеров для применения в различных технологических областях, в том числе в области электронной промышленности. Рассмотрены установки с различными способами накачки (ламповой и диодной) в частотном (порядка 100 Гц) варианте генерации в микронной области инфракрасного диапазона. Проанализированы возможности наращивания энергопотенциала воздействующих импульсов в схемах “задающий генератор-усилитель”, включая двухпроходовое усиление. Обсуждены возможности и перспективы применения лазеров с активными элементами (АЭ) на стекле, а также синтеза крупногабаритных монокристаллов граната с примесью редкоземельных элементов и оптической керамики для изготовления АЭ.

DOI: 10.31857/S0033849423120161, EDN: GZBUBG

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность твердотельных лазеров [1–3], высокое качество луча, отработанная технология изготовления, привлекательность использования в дистанционном воздействии – все это позволяет широко применять их для разнообразных технологических операций в современных высокотехнологических отраслях промышленности для резки, сверления, сварки, наплавки, полировки, упрочнения, наномодификации и прочих операций. Твердотельные лазеры находят применение в электронике, автомобилестроении, авиакосмической, атомной и других областях промышленности.

Для твердотельных лазеров характерны три основных типа генерации: непрерывный, импульсный, в миллисекундной пачке наносекундных импульсов, и режим модулированной добротности, при котором генерация происходит в наносекундном импульсе. Естественно, что благодаря интенсивному развитию электроники возникло множество вариантов получения излучения с требуемой (и практически любой) длительностью импульса. Однако, как правило, изменение этого параметра происходит за счет заметного снижения КПД.

Наибольшее распространение получили лазеры на монокристаллах граната, легированные трехвалентными ионами редкоземельных элементов [4]. Наиболее часто применяется неодим, Nd:YAG-лазер. Характерные параметры при работе лазера в режиме модулированной добротности: длина волны $\lambda = 1.064$ мкм, энергия в импульсе до нескольких десятков джоулей при длительности $\tau = 10...50$ нс, частота повторения f – несколько десятков герц (до 100), средняя мощность от нескольких сотен ватт до нескольких киловатт [5]. Но в отдельных случаях используют и другие элементы: Er³⁺ – эрбий, Ho³⁺ – гольмий, Tm³⁺ – тулий, Yb³⁺ – иттербий.

В данной работе рассмотрены современные возможности создания сравнительно мощных технологических лазеров подобного типа. Так как большинство технологических применений лазеров основано на тепловом действии света, приводящего к абляции поверхностного слоя обрабатываемого материала, то очевидно, что мощность и энергия лазерных импульсов являются основными параметрами, определяющими применимость лазера для решения поставленной задачи [6]. Немаловажным фактором является расходимость излучения, характеризующая возможность обеспечения необходимой плотности энергии излучения на обрабатываемом материале.

Наиболее важный параметр теплового воздействия для импульсного излучения — плотность мощности в импульсе, $q = P_{\text{имп}}/S = W_{\text{имп}}/\tau S$ ($P_{\text{имп}}$ — пиковая мощность импульса, $W_{\text{имп}}$ — энергия импульса, τ — его длительность, S — площадь лазерного пятна). Необходимая средняя плотность энергии обеспечивается средней мощностью частотно-импульсного излучения $P_{\text{ср}}$, которая связана с мощностью импульса $P_{\text{имп}}$ соотношением

$$P_{\text{имп}} = P_{\text{ср}}/f\tau. \quad (1)$$

Таким образом, даже при малом значении энергии импульса $W_{\text{имп}}$ за счет очень короткой длительности импульса τ удается обеспечить необходимую степень воздействия излучения. Примером служат нано-, пико- и фемтосекундные лазеры, уже широко применяемые в промышленности.

При оценке эффективности применения коротких лазерных импульсов следует понимать, что чем меньше τ , тем меньше толщина слоя, испаренного при воздействии одного импульса: $h_{\text{исп}} \sim W_{\text{ит}}$.

1. ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для получения достаточно мощных лазерных импульсов наносекундной длительности необходимо изготовление крупноапертурных активных элементов (АЭ). Проблемы выращивания высококачественных монокристаллов Nd:YAG большого диаметра привели к поиску альтернативных лазерных сред, в которых было бы возможно внесение большой концентрации редкоземельной примеси (в данном случае неодима) в более доступной технологической ситуации. Первоначально в качестве среды АЭ было выбрано оптическое стекло (рис. 1) [7]. Такие элементы могут быть изготовлены значительно больших размеров (существуют стеклянные элементы диаметром более 1.5 м [2]), причем лучшего оптического качества. Поэтому для мощных твердотельных лазерных систем (в тех случаях, когда не требуется заметная частота повторения импульсов) выходные каскады усилителей изготавливаются из стекла. Очевидно, что с технологической точки зрения получение стеклянных АЭ было гораздо более простым решением, нежели выращивание высокотемпературных монокристаллов. Достаточно сказать, что температура процесса варки стекла 1000...1200°C [8], а плавления граната около 2000°C [9].

Из-за этого первоначально твердотельные лазеры развивались на основе стеклянных АЭ. Однако с повышением требований к выходным характеристикам быстро выяснилось, что из-за жестких требований по термостабилизации АЭ на стеклах невозможно получать короткие мощные лазерные импульсы даже с небольшой частотой повторения [1, 2].

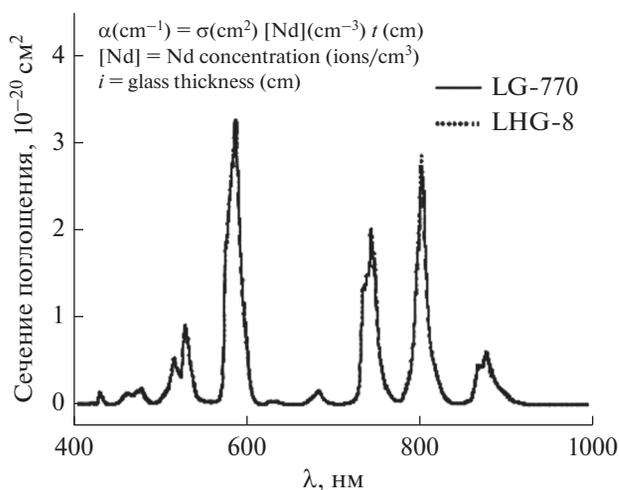


Рис. 1. Спектр поглощения двух фосфатных стекол LG 770 и LHC-8, активированных Nd [1].

Спектр поглощения кристалла Nd:YAG показан на рис. 2.

В частотно-импульсных лазерах в качестве АЭ обычно используется монокристалл алюмоиттриевого граната, легированный примесью неодима, Nd:YAG. В настоящее время основным и, даже единственным производителем в России АЭ этого типа является ООО НПФ “Экситон” (г. Ставрополь). На рис. 3 показаны образцы их продукции. НПФ “Экситон” обладает необходимой производственной базой (включая дефицитные дорогостоящие крупногабаритные иридиевые тигли) для выращивания крупноапертурного граната. Они не только выращивают, но и обрабатывают монокристаллы граната, легированные неодимом и другими редкоземельными элементами, диаметром до 45 мм. Однако технология роста не позволяет полностью использовать выращенный кристалл. При увеличении диаметра, его центральная часть оказывается насыщенной ростовыми дефектами и потому непригодна для использования в оптике (<http://npf-exiton.ru/product.html>).

Для кристаллов Nd:YAG, выращенных методом Чохральского, характерны два оптических дефекта: центральный дефект и фасетки. Дефекты обусловлены гранным ростом кристалла и образуются в области срастания граней кристаллографических ориентаций [10–12]. Наличие дефектов вводит ряд ограничений при выборе области кристалла для изготовления лазерных АЭ. Неоднородность кристаллов по сечению очень велика, поэтому использовать можно в основном только периферийную зону. Например, для изготовления оптически однородного АЭ диаметром 15 мм необходимо вырастить монокристалл диаметром не менее 45 мм (рис. 4). Видно, что реально из него можно вырезать АЭ диаметром ~15 мм. Увеличение диаметра выращиваемого кристалла приводит к существенным изменениям тепло-массо-переноса на

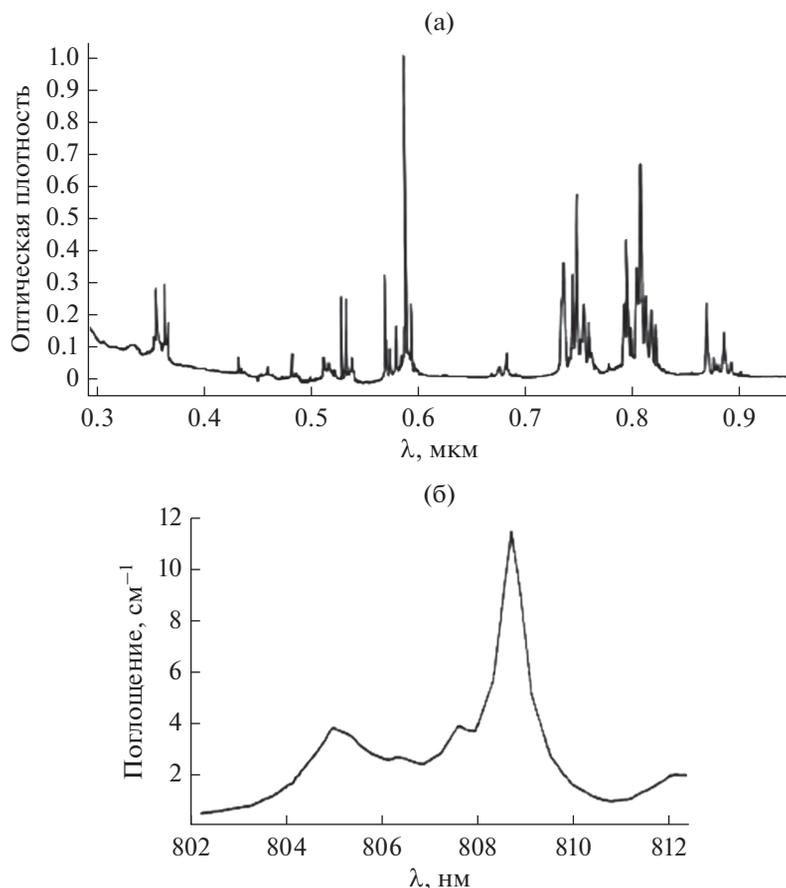


Рис. 2. Спектры поглощения Nd:YAG в области от 0.3 до 0.9 мкм (а) и в увеличенном масштабе вблизи 808 нм (б) [1].

границе роста (кристалл–расплав) и, как следствие, к кардинальным изменениям процесса синтеза кристалла, т.е. увеличение диаметра АЭ представляет собой технически сложную задачу.

В настоящее время в нашей стране максимальный по объему монокристаллический АЭ Nd:YAG

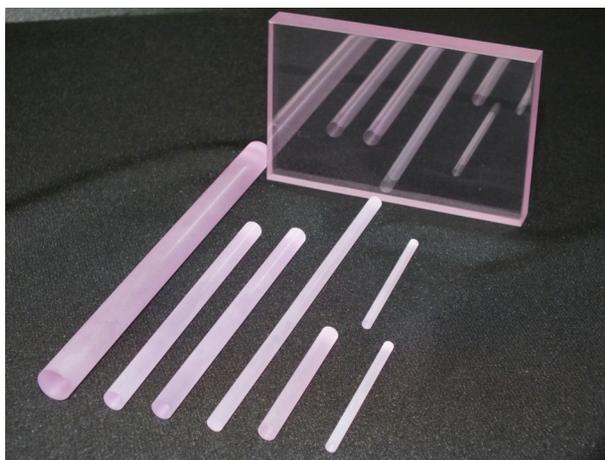


Рис. 3. Образцы лазерной продукции, выпускаемой в России (<http://npf-exiton.ru/product.html>).

(<http://npf-exiton.ru/product.html>) представляет собой стержень размером 15×180 мм.

Есть и еще одна проблема – экономическая. Рост граната происходит при температуре $\sim 2000^\circ\text{C}$ [10–12]. Чтобы вырастить кристалл, необходим иридиевый тигель. Иридий же представляет собой весьма редкий, дорогой и крайне дефицитный металл. Цена тиглей даже средней емкости уже оказывается баснословной, а еще большие тигли становятся просто некупаемы – поэтому их не производят.

Ну и, пожалуй, главная причина – в коэффициенте “входимости” Nd в кристалл. Он характеризуется отношением 1 : 5, т.е. надо внести пять частей Nd, а в матрицу войдет только одна. Поэтому примесь трудно равномерно распределить по объему. А в стержневой конструкции – особенно. Легче эту равномерность обеспечить вдоль оси, а не по диаметру кристалла. Таким образом, тонкие и длинные стержни обладают лучшими эксплуатационными параметрами. Но этот конструктивный тип менее прочен, так как начинают сказываться консольные свойства.

Поэтому линейное увеличение диаметра кристалла не приводит к линейному увеличению максимального диаметра АЭ, вырезаемого из не-

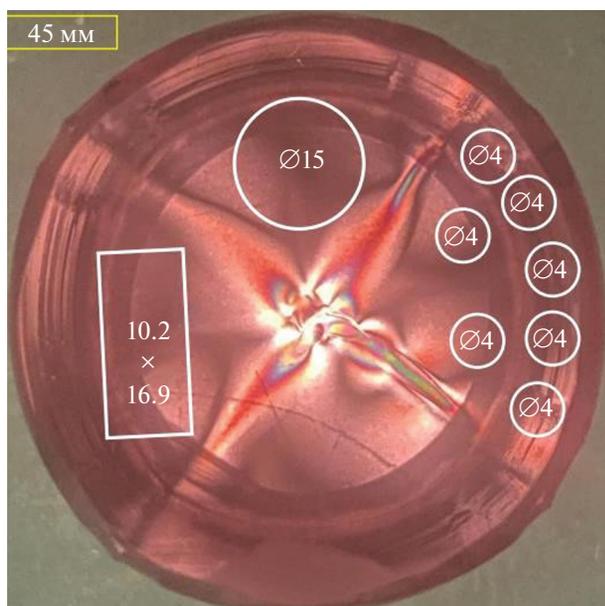


Рис. 4. Поперечное сечение кристалла Nd:YAG диаметром 45 мм.

го. К сожалению, это обусловлено еще и изменением угла фронта кристаллизации в сторону уменьшения при увеличении диаметра кристалла. Этот процесс, в свою очередь, приводит к увеличению площади оптических дефектов в сечении кристалла. Но несмотря на это увеличение диаметра кристалла обладает рядом преимуществ. Оно позволяет осуществлять вырезку элементов с максимально возможной однородностью материала. В этом случае в поперечном сечении АЭ наблюдается более однородное распределение легирующей примеси, главным образом вдоль фронта кристаллизации. При увеличении диаметра кристалла фронт кристаллизации стремится к нормали оси роста и, как следствие – к оси кристаллографической ориентации, вдоль которой вырезают АЭ. Это снижает влияние ряда отрицательных факторов при генерации излучения.

Поиски матричного материала, сочетающего в себе достоинства оптического стекла и высокотеплопроводного алюмоиттриевого граната, привели к неожиданному, на первый взгляд, решению. Была разработана высокопрозрачная оптическая керамика на основе нанокристаллов алюмоиттриевого граната, легированного редкоземельными примесями [13]. Ведь оптическая прочность граната на несколько порядков выше прочности оптического стекла [14], да и другие физико-химические параметры, прежде всего теплофизические, граната значительно лучше, чем у стекла.

Впервые высокопрозрачная оптическая керамика Nd:YAG была синтезирована в 1995 г. [13]. Полученная удельная мощность лазерного излучения в этой керамике не уступала реализованной в монокристаллических элементах. Новый

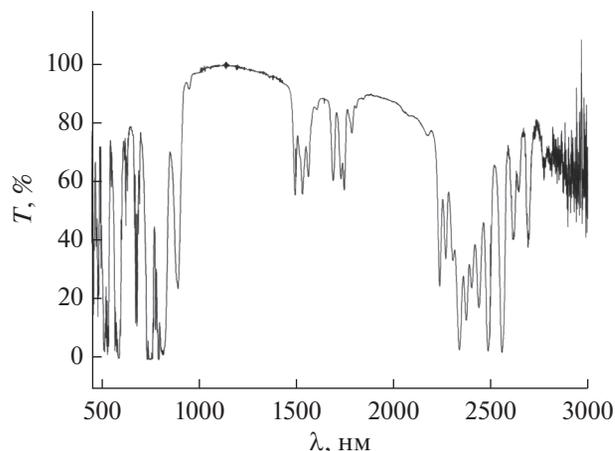


Рис. 5. Спектр пропускания $T(\lambda)$ нанокристаллического керамического лазерного стержня Nd:YAG диаметром 8 мм и длиной 130 мм, полученный с помощью двухлучевого спектрофотометра “Cary-500”.

материал на основе YAG оказался крайне привлекательным для создания лазерных АЭ. Это объясняется кажущейся простотой изготовления, сравнительно низкой стоимостью, отсутствием принципиальных ограничений на размеры.

Однако выяснилось, что для достижения высокой прозрачности керамики необходимо, чтобы потери излучения на поглощение и рассеяние в активном элементе не превышали величину $\sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Для этого потребовалось выполнить ряд обязательных условий, в первую очередь это малая толщина межзеренных границ исходных нанокристаллов ($\sim 1 \text{ нм}$) и отсутствие в керамике пор и вторых фаз (менее 1...10 ppm) [15, 16]. В настоящее время технология производства лазерной керамики позволяет получать образцы, по прозрачности сопоставимые с монокристаллами [13, 15, 16].

Однако несмотря на внешнюю простоту, технология оказалась весьма сложной, и многочисленные попытки ученых разных стран далеко не везде привели к желаемому результату. К сожалению, для получения нужного результата требуется применение энерго- и ресурсозатратных технологий (например, комбинация вакуумного спекания и изостатического горячего прессования). На рис. 5 приведен спектр пропускания нанокристаллического керамического АЭ Nd:YAG диаметром 8 мм и длиной 130 мм, полученный с помощью двухлучевого спектрофотометра “Cary-500” (фирма Varian). Видно, что в рабочей области спектра пропускание близко к 100%. Но в луче полупроводникового лазера с $\lambda = 0.66 \text{ мкм}$ ни дефектов, ни заметного рассеяния не наблюдалось.

Проведен цикл работ в этом направлении, например, [17–21] (рис. 6), но возможности созданного оборудования оказались недостаточны. К сожалению, производимая на основе косвенных

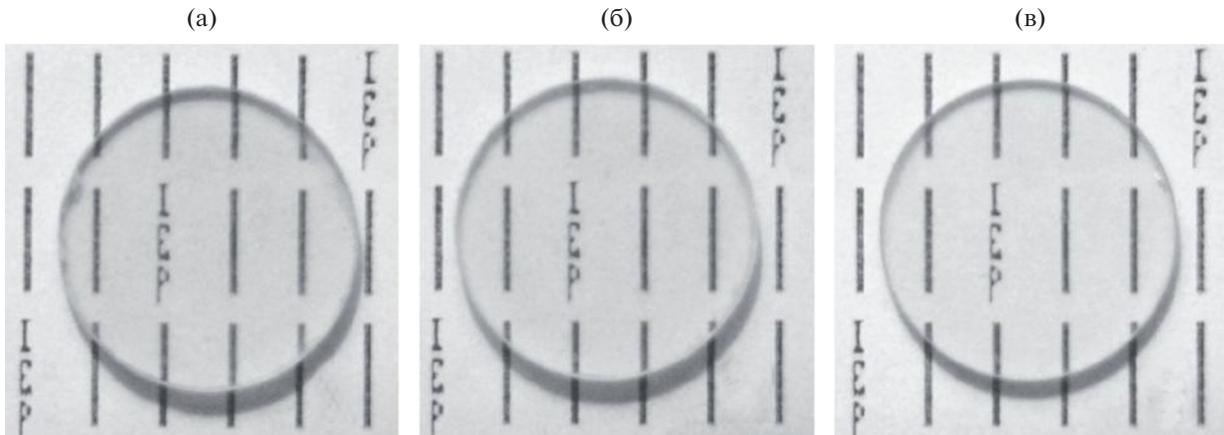


Рис. 6. Фотографии образцов оптических керамик Ho:YAG (а), Yb:YAG (б) и Nd:YAG (в), полученных в работе [21].

данных оценка реальных потерь в такой лазерной керамике пока приводит к величине, заметно превышающей 10^{-4} см^{-1} . Это обстоятельство пока не позволило создать экономически высокоэффективные частотно-импульсные лазерные системы на керамических АЭ с большой энергией лазерного импульса и высокой частотой их повторения.

Все указанные обстоятельства являются причиной того, что на сегодня лазерная керамика высокого оптического качества стоит значительно дороже монокристаллов. Поэтому мощные твердотельные наносекундные частотно-импульсные системы в настоящее время в основном производят на основе монокристаллических АЭ.

2. ИСТОЧНИКИ НАКАЧКИ

Генерация твердотельных лазеров происходит путем поглощения излучения накачки и переизлучения по классической четырехуровневой схеме [1–3]. Поэтому ресурс функционирования твер-

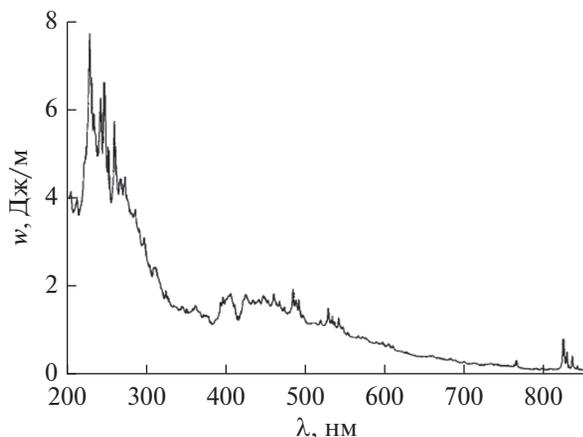


Рис. 7. Спектральная плотность энергии излучения $w(\lambda)$ разряда ксеноновой лампы [24].

дотельного лазера, как правило, определяется не ресурсом кристалла, а ресурсом его накачки.

Первоначально для оптической накачки АЭ были специально разработаны импульсные ксеноновые лампы [22, 23]. На рис. 7 приведена спектральная плотность энергии излучения разряда ксеноновой лампы [24]. Срок службы таких ламп составляет порядка 10^8 импульсов [2]. Лампы для накачки лазерного стержня обычно располагаются в устройстве, называемом “квантрон” (рис. 9).

Самые популярные лампы, например российского производства, для накачки в Nd:YAG-лазеров уровня ~ 1 Дж, типа ИНП 7×120 имеют мощность 6 кВт, а ИНП 6×90 – 4.5 кВт [23]. Лампы могут функционировать и с килогерцовой частотой в пределах допустимой для них мощности; КПД ламповой накачки в режиме свободной генерации составляет $\sim 1\%$. Отсюда возможный режим работы указанных ламп следующий:

– для лампы 7×120 в составе лазера с излучением 1 Дж возможна работа с частотой 60 Гц (6 кВт : 100 Дж);

– для лампы 6×90 возможна частота 45 Гц (4.5 кВт : 100 Дж).

В режиме модулированной добротности КПД вдвое меньше, а это значит, что 1 Дж можно получить только набором ламп, а для обеспечения при этом еще и частоты 100 Гц этот набор надо удвоить. Таким образом, конструкция квантрона, работающего с частотой 100 Гц и излучающего 1 Дж в коротком (~ 10 нс) импульсе, должна содержать четыре лампы накачки. При этом схема блока питания должна реализовывать одновременный поджиг всех четырех ламп. Это обеспечивается последовательным их соединением (при параллельном соединении не исключен неравномерный разброс исходного запаса электроэнергии из-за возможного различия параметров дугового разрядного шнура в лампах [23]). КПД такого лазера составляет обычно не более 1%.

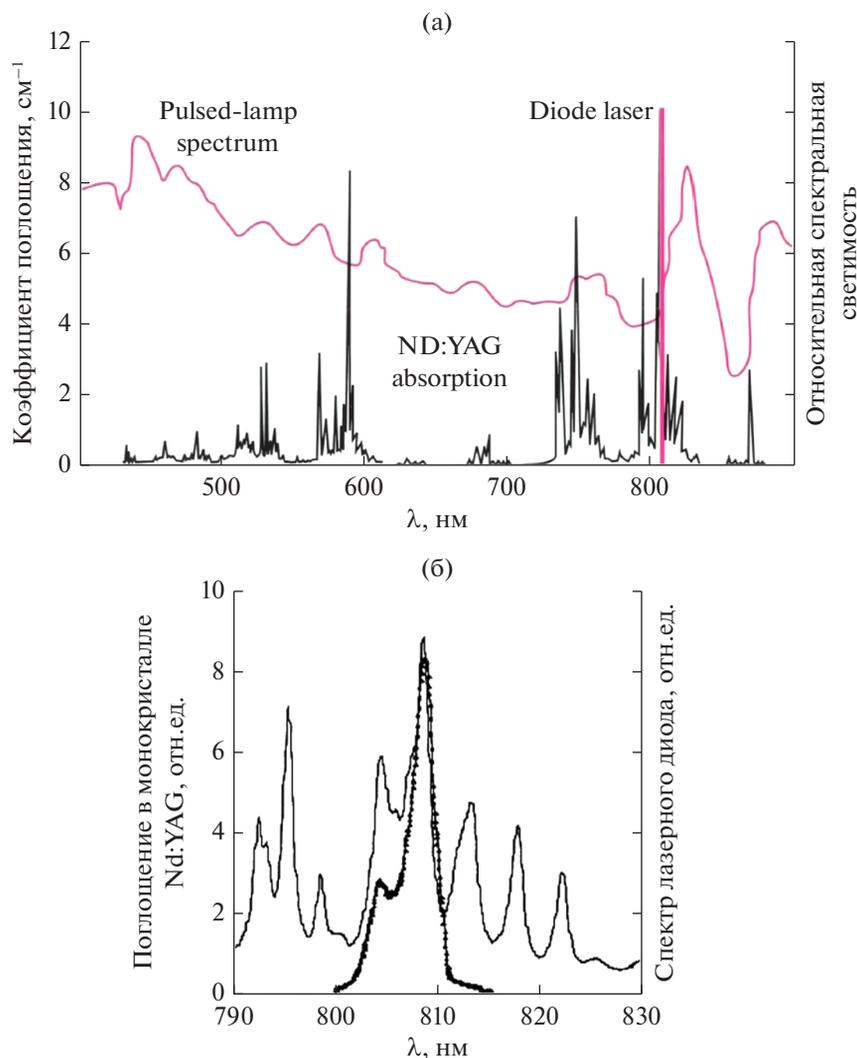


Рис. 8. Спектры поглощения Nd:YAG и излучения ламп накачки и диода накачки (http://www.laserportal.ru/content_1184) (а); наложение спектра излучения диода накачки на спектр поглощения Nd:YAG [1] (б).

В настоящее время для оптической накачки неодимовых лазеров применяются специально разработанные линейки полупроводниковых лазеров. Яркость полупроводниковой накачки на порядки превосходит яркость газоразрядных источников света. Спектральный состав излучения может быть согласован с полосами поглощения редкоземельных ионов-активаторов [4] — благодаря тому, что полупроводниковый диод излучает строго в полосе поглощения Nd:YAG.

Если накачка осуществляется полупроводниковыми лазерами, то в режиме модуляции добротности (длительность ~ 10 нс) их ресурс $\sim 2 \times 10^9$ импульсов [25–27], (<https://www.melsytech.com/technology>).

Большой срок службы полупроводниковых лазеров также играет в пользу диодной накачки. Он составляет более 10000 ч, а иногда и сотен тысяч часов. Это обеспечивает бесперебойную работу в течение нескольких лет даже в условиях интенсивной эксплуатации. В связи с этим требо-

вания к системе охлаждения лазерного стержня упрощаются. КПД таких лазеров может достигать 10% (при питании от розетки), а частота повторения импульсов может достигать — 100 Гц и даже более [26]. В табл. 1 сопоставлены возможности ламповой и диодной накачки для твердотельных лазеров.

3. ЛУЧЕВАЯ СТОЙКОСТЬ АЭ И РЕЗОНАТОРНОЙ ОПТИКИ

Стойкость оптических элементов к воздействию интенсивного лазерного излучения является одним из основных критических параметров, определяющим предельные характеристики лазерных систем. В различных каталогах на лазерную оптику для излучения с 1064 нм наносекундного диапазона указывается, что характерная лучевая стойкость просветляющих покрытий на торцах активных элементов $\sim 12...13$ Дж/см²,

Таблица 1. Сопоставление ламповой и диодной накачки для твердотельных лазеров (по данным <https://www.mel-sytech.com/technologies>)

Тип накачки	Ламповая	Диодная
Технология	Традиционная	Передовая
Эксплуатация	Сложная настройка, как правило, требуется сервисный инженер	Работа с первого включения
Ресурс источника лазерного излучения	Лампа, до одного года	Лазерные чипы, пять лет и более
Оптическая мощность и энергия	Высокая	Высокая
Обслуживание	Стороннее, дорогостоящее	Самостоятельное, недорогое
Частота повторения импульсов	1–25 Гц	1–100 Гц
КПД	<5%	>50%
Энергопотребление	Высокое	Низкое
Стоимость эксплуатации	Высокая	Низкая

покрытий на зеркалах ~ 15 Дж/см², а кварцевых подложек ~ 20 Дж/см² [1, 28]. На сайте ООО “Электростекло” (<http://elektrosteklo.ru/>) сообщается, что просветляющие, зеркальные, светоделительные покрытия для лазерной техники, имеют порог разрушения до 30 Дж/см² для 10 нс импульса.

Следует учитывать, что исследования лучевой стойкости проводятся, как правило, на пятнах, существенно меньших 1 мм². Известно [28], что величина лучевой стойкости резко снижается при увеличении размера лазерного пятна. Значительное снижение порога разрушения реально используемой лазерной оптики находит свое объяснение в рамках механизма разрушения, связанного с концентрацией наиболее “опасных” поглощающих центров на границе подложка–покрытие [28, 29]. (<http://elektrosteklo.ru/>).

Основными причинами снижения величины порога оптической стойкости элементов оптики в процессе эксплуатации частотно-импульсного лазера являются, по-видимому, усталостные эффекты. Они возникают вследствие совокупности воздействия на поверхность элемента лазерного излучения и оптико-механических эффектов. Причиной последних являются процессы многократных циклов нагрев–охлаждение, вызванных остаточным поглощением излучения. Поэтому считается, что заявленный ресурс работы лазерного стержня ($\sim 10^9$ импульсов) реализуется при умеренном “съеме” энергии с АЭ – не более ~ 2 Дж/см².

Поскольку возможности повышения плотности выходной энергии на торце стержня уже практически исчерпаны, то для получения наносекундных лазерных импульсов микронного спектрального диапазона с энергией импульса, превышающей 1 Дж в лазере промышленного применения, требуется активный элемент с существенно большей площадью сечения. В этом случае энергия им-

пульса пропорциональна площади сечения лазерного стержня, так как резервы по увеличению интенсивности излучения накачки имеются.

4. НЕКОТОРЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРОВ

На рис. 9 приведен внешний вид наносекундного Nd лазера на стекле с ламповой накачкой¹ излучающего импульсы с выходной энергией до 1 кДж. Он был создан по схеме “генератор–усилитель”. Задающий генератор на Nd:YAG с электрооптическим затвором формировал импульс заданной длительности, который с помощью телескопической системы зеркал вводился в стержень усилителя (диаметр 100 мм) из оптического стекла, легированного неодимом. Как хорошо видно из рисунка, усилитель этого лазера состоял из двух таких квантронов с ламповой накачкой.

В конце 80-х годов XX в. в НПО “Астрофизика” был разработан частотно-импульсный неодимовый лазер на стекле (рис. 10) (<https://djvu.online/file/GpQ5t5C68gvCG>, файл 33). Увеличение частоты достигалось за счет использования 64-х квантронов, расположенных в пространстве по “револьверной” схеме. С помощью вращающегося оптического коммутатора один из квантронов попадал в область резонатора и включался поочередно с выводом излучения на общую оптическую ось. Происходила генерация лазерного импульса. Затем на его место перемещался следующий квантрон, а этот остывал. Установка способна излучать пакет импульсов средней мощности ~ 150 кВт в течение 2...3 с.

Номинальная энергия канала 1.5...2 кДж, длительность импульса ~ 1 мс, общая частота повторения импульсов 100 Гц. Когда стержни перегрева-

¹ Ефремов А.С. частное сообщение, Москва, 2007 г.

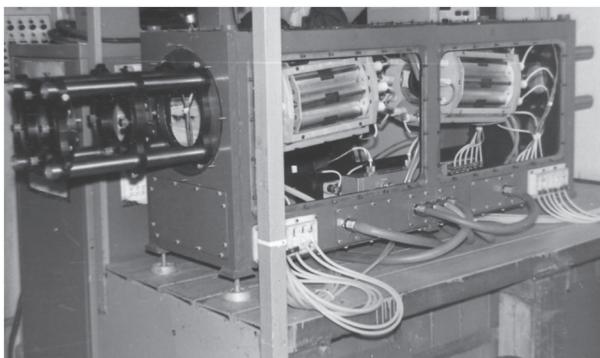


Рис. 9. Внешний вид наносекундного Nd лазера на стекле с ламповой накачкой, излучающего импульсы с выходной энергией до 1 кДж.

лись, лазер выключался до момента их остывания до комнатной температуры. При этом использовались источник питания с характеристиками 6 кВ, 10 МВт, 50 Гц и промышленная сеть без накопителя энергии. Впоследствии эта лазерная система была доработана путем перевода в режим модулированной добротности.

Как показано выше, генерация в этом типе твердотельного лазера происходит благодаря возбуждению ионов активных примесей редкоземельного элемента, в данном случае — неодима. Физико-химические свойства матрицы — алюмоиттриевого граната — и, прежде всего, высокая теплопроводность, обеспечивают чрезвычайно высокую температурную стабильность режима работы лазера.

С появлением достаточно эффективных полупроводниковых диодов оптической накачки были созданы лазеры, имеющие иную геометрию активного элемента — это лазеры планарной конфигурации [30] и дисковые лазеры [31–33].

Использование планарной конфигурации активных элементов твердотельных лазеров позволяет существенно повысить плотность мощности и однородность накачки всего объема активного элемента. Улучшаются условия охлаждения, и уменьшается влияние термооптических искажений. Дисконная накачка обеспечивает высокий КПД лазера. Преимущества планарной конфигурации заключаются в более эффективном решении проблемы термостабилизации ввиду того, что тепло отводится через широкие боковые грани, а в стержнях радиальная составляющая градиента температуры гораздо выше [30].

Примесь иттербия может быть введена в гранат при очень высокой концентрации, до 5.5%. Это позволяет использовать АЭ из кристалла Yb:YAG в геометрии тонкого диска [31–33]. Тогда охлаждение происходит вдоль оси распространения пучка и не ограничивает апертуру активного элемента. Диск охлаждается принудительно через зеркальное покрытие с обратной стороны кри-

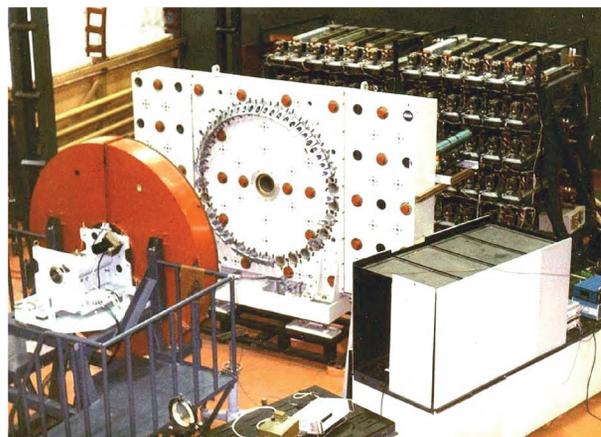


Рис. 10. Лазерная установка "ТАНДЕМ" на стекле с неодимом с частотой повторения импульсов 100 Гц.

сталла с высокими отражающими свойствами, с помощью алмазного теплоотвода [34]. При этом генерируется одномерный поток тепла. Поэтому температурный градиент распределяется параллельно лазерному лучу и не приводит к появлению эффекта тепловой линзы.

С использованием водяного охлаждения получено 200 мДж при средней мощности до 1 кВт [4]. На рис. 11 приведена принципиальная схема такого лазера, созданного компанией TRUMPF. Впоследствии они довели среднюю мощность до 20 кВт. Лазер состоит из серии дисковых модулей в одном резонаторе.

После частичного поглощения излучения диодов накачки при прохождении через диск, часть энергии пучка отражается от расположенного на тыльной стороне диска зеркала с высоким коэффициентом отражения. При многократном отклонении через призмы и параболическое зеркало получается до 20 итераций прохождения излучения через тело диска. Так достигается высокая эффективность поглощения света накачки в АЭ.

Более эффективное поглощение излучения накачки позволяет существенно снизить энергопотребление технологической установки. Кроме того, меньше энергии уходит в тепловые потери. В этом случае КПД дисковых, а также волоконных лазеров достигает 24...30%. [15].

Было найдено и другое техническое решение, позволяющее эффективно решать проблему теплоотвода с активного элемента. Созданы весьма мощные волоконные лазеры, которые сейчас активно работают в самых разных отраслях промышленности [35]. В этих лазерах активным элементом является специально сконструированное многослойное стекляннное оптическое волокно диаметром менее 1 мм, накачиваемое полупроводниковыми диодами. Из-за проблем с оптической стойкостью такие лазеры работают преимущественно в непрерывном режиме. В частотно-им-

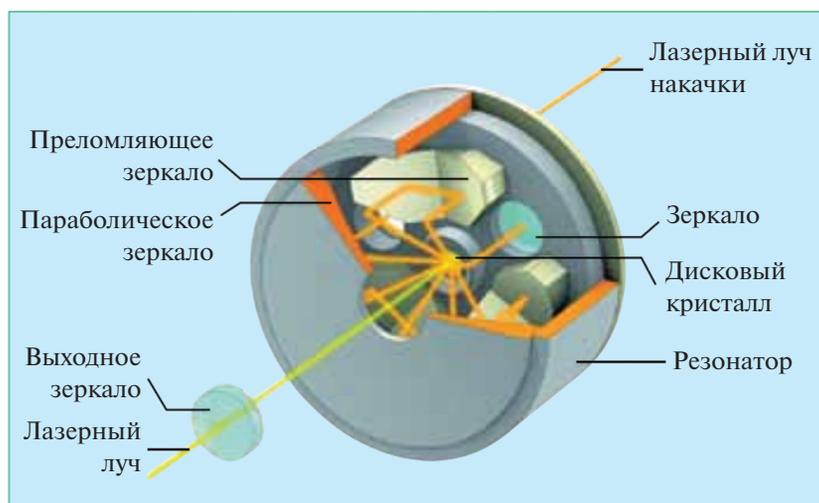


Рис. 11. Схематическое изображение дискового лазера фирмы TRUMPF [33].

пульсном режиме волоконные лазеры генерируют импульсы порядка миллиджоулей, но частота их повторения может составлять десятки килогерц [35].

Итак, в моноимпульсном режиме на стеклянных неодимовых лазерах были получены импульсы наносекундного диапазона с выходной энергией сотни джоулей. К сожалению, для технологических применений, как правило, требуется частота повторения на уровне не менее 10...100 Гц.

В табл. 2 приведены основные характеристики неодимовых лазеров, производящихся в настоящее время в России.

Отчетливо видно, что в кристаллическом Nd:YAG лазере, используемом для практических применений, на сегодня реально достижима

энергия в импульсе порядка 1 Дж, при частоте повторения импульсов f до 50...100 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что ограничения в масштабе роста АЭ стержневой конфигурации определяются “нерентабельной” величиной коэффициента входимости Nd в матрицу (1 : 5) и связанными с этими проблемами его однородного распределения по радиусу (в отличие от осевого). В пластинчатых конфигурациях этот эффект проявляется в значительно меньшей степени.

Поскольку возможности повышения плотности выходной энергии на торце стержня уже практически исчерпаны, то для получения наносекундных лазерных импульсов спектрального

Таблица 2. Параметры российских неодимовых лазеров

Тип лазера	Параметр					
	Длина волны, мкм	Энергия в импульсе, Дж	Длительность импульса, с	Частота повторения импульсов, Гц	Угловая расходимость, мрад	Эффективность (КПД), %
Nd:YAG, электрооптическая модуляция	1.06	1...3	5×10^{-8}	1...50	1	15
Оптическое стекло, легировано Nd	1.06	До 100–1000	10^{-8} – 10^{-9}	0.01	1	<1
Nd:YAG, Лазеры на слэбах	1.06	0.45	10^{-8}	20	<1	20
Nd:YAG, дисковые лазеры	1.06	До 5	10^{-8}	10	<1	25
Nd:YAG, лазеры на оптической керамике	1.06	0.02	1.6×10^{-4}	1...30	1	12
Волоконные лазеры	1.07–1.09	Непрерывный 2000 Вт	–	Непрерывный	–	–

диапазона ~ 1 мкм с энергией импульса более 1 Дж в лазере промышленного применения, требуется АЭ с существенно большей площадью сечения. Тогда энергия импульса пропорциональна площади сечения АЭ, так как резервы по увеличению интенсивности излучения накачки существуют.

Несмотря на существенно большую стоимость полупроводниковых диодов, они на данный момент являются наиболее перспективным способом накачки таких лазеров.

На основе вышеприведенного анализа очевидно, что создание лазерного комплекса для обработки материалов на основе мощных наносекундных неодимовых лазеров является, на сегодняшний день, крайне сложной технической, и дорогостоящей задачей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koechner W.* Solid-State Laser Engineering. N.Y.: Springer, 2006.
2. *Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е.* Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990.
3. *Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А.* Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985.
4. *Шестаков А.* // Фотоника. 2007. № 5. С. 30.
5. *Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибеев С.А.* // Авиационные двигатели. 2022. № 2. С. 59. https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59
6. *Вейко В.П., Петров А.А., Самохвалов А.А.* Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу “Лазерные технологии” / Под ред. В.П. Вейко. СПб: Университет ИТМО, 2018.
7. *Петровский Г.Т., Арбузов В.И., Волькин В.М. и др.* // Оптический журн. 2003. Т. 70. № 5. С. 68.
8. *Саркисов П.Д., Сигаев В.Н., Голубев Н.В., Савинков В.И.* Оптическое фосфатное стекло. Пат. РФ № 2426701 // Опул. Офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 23 от 20.08.2011.
9. *Шаскольская М.П.* Кристаллография. М.: Высш. шк., 1984.
10. *Рыбина Э.Н., Брызгалов А.Н., Живулин Д.Е.* // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6592>.
11. *Багдасаров Х.С., Болотина Н.Б., Калинин В.И. и др.* // Кристаллография. 1991. Т. 36. № 3. С. 715.
12. *Ковтун Г.П., Кравченко А.И., Шербань А.П.* Иттрий-алюминиевый гранат с неодимом: методы выращивания и свойства монокристаллов: Препр. ХФТИ 2004-2. Харьков: ННЦ, ХФТИ, 2004. 16 с.
13. *Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., Yoshida K.* // J. Amer. Ceram. Soc. 1995. V. 78 (4). P. 1033.
14. Технологические лазеры вчера, сегодня и завтра // Оборудование, и инструмент для профессионалов. Сер. Металлообработка 2015. № 2. С. 32. https://www.informdom.com/uploads/metal/15_2/32_TRUMPF_2015_2.pdf.
15. *Ikesue A., Aung Y.L., Taira T. et al.* // Annual Rev. Mater. Res. 2006. V. 36 P. 397.
16. *Kochawattana S., Stevenson A., Lee S.H. et al.* // J. Europ. Ceramic Soc. 2008. V. 28. P. 1527.
17. *Багаев С.Н., Осипов В.В., Пестряков Е.В. и др.* // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 1. С. 180.
18. *Багаев С.Н., Осипов В.В., Ватник С.М. и др.* // Квант. электрон. 2015. Т. 45. № 1. С. 23.
19. *Vatnik S.M., Vedin I.A., Osipov V.V. et al.* // Журн. прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 6–16. С. 602.
20. *Осипов В.В., Шитов В.А., Лукьяшин К.Е. и др.* // Квант. электрон. 2019. Т. 49. № 1. С. 89.
21. *Багаев С.Н., Осипов В.В., Ватник С.М. и др.* // Квантов. электрон. 2015. Т. 45. № 5. С. 492.
22. Импульсные источники света / Под ред. И.С. Маршак. М.: Энергия, 1978.
23. *Камруков А.С., Кулебякина А.И.* Импульсные ксенонные лампы. Техника, эксперимент, расчет: Учебное пособие. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
24. *Рыбка Д.В., Бакирт Е.Х., Ломаев М.И. и др.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 2. С. 131.
25. *Борисов Б.Н., Демкин В.К., Дунин В.М. и др.* / Лазерно-оптические системы и технологии. М.: “НПО Астрофизика”, 2009. С. 8.
26. *Кравцов Н.В.* // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 8. С. 661.
27. *Багдасаров В.Х., Букин В.В., Гарнов С.В. и др.* // Сб. докл. десятой всерос. школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям сборник докладов. Саров: ИПЦ РФЯЦ ВНИИЭФ, 2017. С. 196. <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/Lazer-X-2017.pdf>.
28. *Свечников М.Б.* Лучевая прочность диэлектрических покрытий в диапазоне длин волн 0.25...1.06 мкм. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. С.-Пб.: ВНИЦ ГОИ им. С. И. Вавилова, 1992. 213 с.
29. *Белоцерковец А.В., Бессараб А.В., Куратов Ю.В. и др.* // Квант. электрон. 1992. Т. 19. № 12. С. 1185.
30. *Архипов Д.А., Венлюк В.И., Деревянко В.А. и др.* // Научно-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1000.
31. *Строганова Е.В., Галуцкий В.В., Ткачев Д.С., Яковенко Н.А.* Монокристаллический материал для дискового лазера. Пат. РФ № 2 591 257 // Опул. Офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 20 от 20.07.2016.
32. *Бадалян Н.П., Козлов А.Б., Левчук Е.А. и др.* Активный элемент дискового лазера. Пат. РФ № 2439761 // Опул. Офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 1 от 10.01.2012.
33. *Вайлер С.* // Фотоника. 2009. № 3. С. 10.
34. *Розалин В.Е., Крымский М.И., Крымский К.М.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1188. <https://doi.org/10.1134/S0033849418110098>
35. *Дианов Е.М.* // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174. № 10. С. 1139. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200410m.1139>