

Применение лазеров в обороне и промышленности

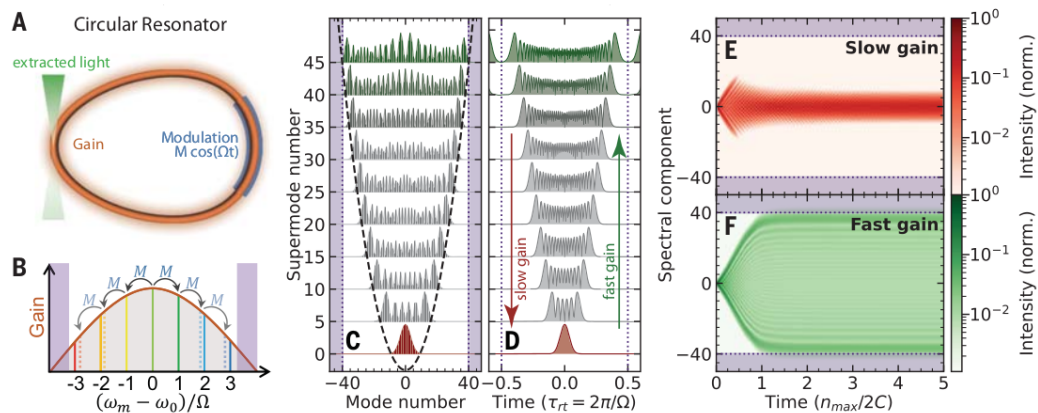
Академик Олег Фиговский.

Использование лазеров в различных отраслях развивается весьма интенсивно. Так ученые из Лаборатории лазерной энергетики (LLE) Рочестерского университета придумали, как термоядерным лазерам самим производить топливные гранулы для работы. В декабре 2022 года сотрудники Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в Калифорнии совершили прорыв в исследованиях термоядерной энергии. Они использовали 192 высокоэнергетических лазера, сосредоточенных на одной точке, и «ударили» ими по грануле дейтерия и трития. Так им впервые удалось вызвать реакцию зажигания инерциального синтеза. Хотя это было великое открытие, до практического применения термоядерного реактора предстоит еще много работы. Команда ученых из Университета Рочестера во главе с Игорем Игуменцевым, старшим ученым LLE, и Валерием Гончаровым, директором теоретического подразделения лаборатории, решили одну из проблем, которые мешают использовать лазерный синтез в реальном мире. Речь идет о производстве топливных гранул, необходимых для работы реактора. Сейчас оно стоит очень дорого, сложное и требует использования жидкого гелия для замораживания дейтерия и трития (радиоактивных изотопов водорода) до температуры всего 11 градусов Кельвина. Работающий термоядерный реактор будет нуждаться в около миллионе таких топливных гранул ежедневно. Сейчас ученые разрабатывают метод, при котором лазеры в реакторе создают собственные топливные «таблетки» перед взрывом и зажиганием. Вместо использования твердых гранул ученые ввели дейтерий и тритий в пенопластовые капсулы. Когда лазеры стреляют в капсулу, капсулы коллапсируют в сферу с той же плотностью, что и жидкое топливо из дейтерия и трития, которое затем взорвется. На данный момент этот процесс — пока проверка концепции с использованием лазера OMEGA LLE. Тем не менее, ученые утверждают, что будущие лазеры с более длинными и энергичными импульсами должны «сработать».

Разновидность кольцевого резонатора в форме яйца позволила физикам создать быстрый каскадный лазер. А его спектральные характеристики послужили основой для создания дополнительной частотной степени свободы. Стремление к миниатюризации оптических систем позволяет не только получать быстрые и хорошо интегрируемые устройства, но и обнаруживать новые физические явления. Ученые уже давно пользуются лазерами, которые умещаются на интегральном чипе, и даже создают схемы для управления оптическим излучением на том же чипе. Одну из ключевых составляющих лазера — резонатор — можно реализовать разными способами. Например, в виде кольца. Кольцевые резонаторы используются не только в лазерных системах, но и для схем задержек, интерферометров, фильтров или в схеме оптического гироскопа. От размеров резонатора зависит то, какая длина волны света будет распространяться по нему наиболее эффективно. Такие длины волн называются резонансными. Команда физиков из Института квантовой электроники в Цюрихе под руководством Жерома Файста (Jérôme Faist) показала, как с помощью кольцевого резонатора с фазовой модуляцией можно создать дополнительную размерность. Они предлагают с ее помощью делать многомерные системы для исследования квантовых блужданий.

Авторы использовали полупроводниковый лазер с резонатором в форме яйца и модулируемой фазой, излучающий в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Важно отметить, что процесс накачки и переизлучения происходит на межзонных переходах (такие лазеры еще называют каскадными и обычно реализуются

в гетероструктурах), поэтому период накачки активной среды — между моментами непосредственно излучения — оказывается очень коротким. Это значит, что лазер может генерировать импульсы с высокой частотой.



1/2

(A) схематичное изображение резонатора, (B) разные состояния в частотном пространстве, фиолетовым показано, что они ограничены, (C,D) сравнение с гармоническим осциллятором и его моды в случае дискретного и непрерывного спектра частот, (E, F) сравнение медленного и быстрого усиления сигнала
Ina Heckelmann et al. / Science, 2023.

Авторы подавали на вход резонатора излучение разных длин волн и мощностей и измеряли выходной спектр. Оказалось, что поведение резонатора можно представить в виде гармонического осциллятора, который имеет ограниченное число мод (в эксперименте число мод ограничено из-за дисперсии). С увеличением номера моды осциллятора увеличивается ширина спектра этой моды, что совпадает с поведением резонатора. Инфракрасная фурье-спектроскопия показала, что в свободном состоянии лазер генерирует одномодовый сигнал и при приближении к резонансу на выходе наблюдается многомодовый режим с довольно плоской центральной частью. При этом он состояние резонанса оказывается довольно стабильным, а перемещение между разными модами как раз задает дополнительную размерность. Помимо применения разработанного лазера, авторы отмечают, что его компоненты быстрого восстановления можно использовать и в других схемах с другими длинами волн.

Ученые создали первый в мире нанофотонный ускоритель электронов, который ускоряет отрицательно заряженные частицы с помощью мини-лазерных импульсов и достаточно мал, чтобы поместиться на монете. Недавно ученые впервые запустили самый маленький в мире ускоритель частиц — нанофотонный ускоритель электронов (NEA). Он состоит из микрочипа, в котором находится крошечная ускорительная трубка длиной всего несколько миллиметров. Сама вакуумная трубка — это тысячи отдельных «столбов». Исследователи могут ускорять электроны, направляя на них

мини-лазерные лучи. Длина главной ускорительной трубы составляет примерно 0,5 мм, что в 54 млн раз меньше кольца длиной 27 км Большого адронного коллайдера ЦЕРН (БАК) в Швейцарии. Это самый мощный ускоритель частиц, который помог физикам обнаружить несколько новых частиц, включая бозон Хиггса (или частицу Бога), призрачные нейтрино, очаровательный мезон и загадочную частицу X. Ширина внутренней части крошечного туннеля составляет всего около 225 нанометров. По данным Национального института нанотехнологий, толщина человеческого волоса составляет от 80 000 до 100 000 нанометров. Исследователи из Университета Эрлангена-Нюрнберга имени Фридриха-Александра (FAU) в Германии использовали крошечное приспособление для ускорения электронов с 28,4 до 40,7 килоэлектронвольт. Это первый случай успешного запуска нанофотонного ускорителя электронов. Впервые его концепцию предложили в 2015 году, пишут исследователи. Сотрудники Стэнфордского университета тоже повторили этот трюк со своим мини-ускорителем, но их результаты все еще находятся на рассмотрении. «Впервые мы действительно можем говорить об ускорителе частиц на микрочипе», — заявил Рой Шайло, физик из FAU и соавтор исследования.

БАК использует более 9 000 магнитов для создания магнитного поля, которое ускоряет частицы примерно до 99,9% скорости света. NEA также создает магнитное поле, но работает, направляя лучи света на столбы вакуумной трубки; это усиливает энергию, но получившееся энергетическое поле намного слабее. Энергия электронов, ускоренных NEA, составляет около одной миллионной от энергии частиц, ускоренных на БАК. Однако физики считают, что они могут улучшить конструкцию NEA, используя альтернативные материалы или располагая несколько трубок рядом друг с другом. Тем не менее, они никогда не достигнут тех же энергетических уровней, что и большие коллайдеры. Однако стоит учитывать, что основная цель создания этих ускорителей — использовать энергию, выделяемую ускоренными электронами, в медицине. В перспективе, NEA может заменить лучевую терапию, которую используют для уничтожения раковых клеток.

Больше века идея передачи энергии по воздуху бродит в умах изобретателей, но законы физики препятствуют ее воплощению. Управление по перспективным исследованиям Министерства обороны США нацелилось совершить прорыв в этой области. DARPA анонсировало новую программу разработки наземных лазерных установок для питания энергией летательных аппаратов, расположенных на расстоянии тысяч километров. Для начала инженеры хотят передать 10 кВт на 200 км. В теории все довольно просто, но на деле придется придумать, как обойти массу технических проблем. Лазеры действуют вдоль линии прямой видимости, так что в верхних слоях атмосферы нужно будет разместить воздушные реле для минимизации помех и ослаблений луча, вызванных водяными парами в воздухе. Кроме того, передатчики и реле должны иметь возможность наводиться на подвижную цель и корректировать положение луча. Однако самая серьезная проблема — огромные потери, вызванные многократными преобразованиями света лазеров в электричество и обратно. Пока проект под названием POWER находится в первой фазе, которая включает разработку концептуального дизайна реле. Вторая фаза будет касаться интеграции этой технологии в корпус какого-нибудь из существующих летательных аппаратов. В третьей будут проведены испытания по передаче 10 кВт энергии на 200 км. «Энергия требуется для любой деятельности человека, включая оборону. Нам нужны методы передачи энергии для преодоления уязвимости и других ограничений нашей текущей парадигмы. Следующий шаг вперед в направлении

оптического излучения может быть тесно связан с релейными технологиями», — сказал Пол Джаффе, руководитель программы POWER.

Специалисты из США разработали новый тип медицинского сонографа — лазерное ультразвуковое устройство (NCLUS), которое делает снимки внутренних органов, кровеносных сосудов, мышечных тканей и сухожилий не только неинвазивно, но и бесконтактно. Кроме того, оно измеряет прочность костей и может использоваться для отслеживания хода заболеваний. При проведении процедуры УЗИ к коже пациента прижимают ультразвуковой датчик, который излучает звуковые волны, проходящие через ткани тела и отражающиеся от различных типов клеток: жира, мускулов, кровеносных сосудов, костей. Эхо от этих волн создает снимок внутренностей, а особые режимы обработки данных позволяют построить изображения в двух или трех измерениях. При проведении процедуры УЗИ к коже пациента прижимают ультразвуковой датчик, который излучает звуковые волны, проходящие через ткани тела и отражающиеся от различных типов клеток: жира, мускулов, кровеносных сосудов, костей. Эхо от этих волн создает снимок внутренностей, а особые режимы обработки данных позволяют построить изображения в двух или трех измерениях. Несмотря на высокую точность современных аппаратов УЗИ, метод не лишен недостатков. Управление датчиком вручную требует опыта, а давление прибора вызывает непредсказуемые изменения в свойствах тканей, которые влияют на траектории звуковых волн. Вдобавок, даже небольшой наклон датчика меняет угол обзора и лишает картину точности. Все это не позволяет с достаточной уверенностью использовать снимки УЗИ в медицине. Например, невозможно установить, увеличивается или уменьшается опухоль или где она расположена.

Команда инженеров из MIT и Общеклинической больницы Массачусетса решила эту проблему путем автоматизации получения ультразвуковых изображений и внедрения лазерного позиционирования. Благодаря отсутствию контакта с кожей пациента не возникает изменений в тканях. Уникальные маркеры на коже позволяют точно воспроизводить снимки, а специальная программа сравнивает результаты сканирования. Бесконтактный метод подходит для обследования чувствительных и болезненных зон или в случае риска заражения. «NCLUS может делать снимки больных с ожогами или травмами, с глубокими повреждениями тканей прямо в процессе операции, недоношенных детей, требующих интенсивного ухода, пациентов с травмами шеи и позвоночника, инфицированных заразными болезнями», — сказал Роберт Хаупт, руководитель исследовательской группы. В состав комплекса NCLUS входит импульсный лазер, передающий оптическую энергию через воздух на поверхность кожи. Импульс вызывает мгновенное локальное повышение температуры и деформацию кожи из-за эффектов термоупругости, которые, в свою очередь, генерируют ультразвуковые волны — такое явление называют фотоакустическим. Оптический импульс передает достаточно ультразвуковой энергии на частотах, совместимых с современными аппаратами УЗИ, и не вызывает никаких неприятных ощущений на коже. В 2019 году команда MIT разработала первый опытный образец устройства, но тогда его разрешение было существенно ниже, чем у традиционных аппаратов УЗИ. Будущие модели стали работать быстрее и на более высоких частотах, добившись разрешения в 200 микрон. Дальше инженеры планируют заняться разработкой аппарата NCLUS для применения в военно-полевых госпиталях

Лазеры сверхвысокой мощности в основном используются при резке и сварке в судостроении, аэрокосмической отрасли, безопасности объектов атомной энергетики и т. д. Внедрение волоконных лазеров сверхвысокой мощности мощностью 60 кВт и выше вывело мощность промышленных лазеров на новый уровень. Следуя тенденции развития лазеров, компания Teu выпустила сверхмощный волоконный лазерный охладитель CWFL-60000. За последние три года из-за пандемии темпы роста спроса на промышленные лазеры замедлились.

Однако развитие лазерных технологий не остановилось. В области волоконных лазеров последовательно внедряются сверхмощные волоконные лазеры мощностью 60 кВт и выше, что поднимает мощность промышленных лазеров на новый уровень. В эпоху киловаттных волоконных лазеров мощность ниже 6 кВт можно использовать для резки и сварки большинства распространенных металлических изделий, таких как лифты, автомобили, ваннные комнаты, кухонная утварь, мебель и шасси, толщиной не более 10 мм как для листового, так и для трубчатого материала. Скорость резки лазера мощностью 10 000 Вт в два раза выше, чем у лазера мощностью 6 000 Вт, а скорость резки лазера мощностью 20 000 Вт более чем на 60% выше, чем у лазера мощностью 10 000 Вт. Он также превышает ограничения по толщине и может резать углеродистую сталь толщиной более 50 мм, что редко встречается в обычных промышленных изделиях. А как насчет лазеров высокой мощности свыше 30 000 Вт?

В апреле этого года президент Франции Макрон посетил Китай в сопровождении таких компаний, как Airbus, DaFei Shipping и французского поставщика электроэнергии Électricité de France. Французский производитель самолетов Airbus объявил о соглашении о оптовой закупке с Китаем 160 самолетов общей стоимостью около 20 миллиардов долларов. Они также будут строить вторую производственную линию в Тяньцзине. Корпорация China Shipbuilding Group подписала соглашение о сотрудничестве с французской компанией DaFei Shipping Group, включающее строительство 16 сверхбольших контейнеровозов типа 2 стоимостью более 21 млрд юаней. China General Nuclear Power Group и Électricité de France тесно сотрудничают, классическим примером является Тайшаньская АЭС. Мощное лазерное оборудование мощностью от 30 000 до 50 000 Вт позволяет резать стальные пластины толщиной более 100 мм. Судостроение — это отрасль, в которой широко используются толстые металлические листы: типичные коммерческие суда имеют стальные листы корпуса толщиной более 25 мм, а большие грузовые суда даже превышают 60 мм. Большие военные корабли и сверхбольшие контейнеровозы могут использовать специальные стали толщиной 100 мм. Лазерная сварка имеет более высокие скорости, меньшую тепловую деформацию и доработку, более высокое качество сварного шва, уменьшенный расход присадочного материала и значительно улучшенное качество продукции. С появлением лазеров мощностью в десятки тысяч ватт больше нет ограничений в области лазерной резки и сварки в судостроении, что открывает большой потенциал для будущей замены. Роскошные круизные лайнеры считаются вершиной судостроительной промышленности, традиционно монополизированной несколькими верфями, такими как итальянская Fincantieri и немецкая Meyer Werft. Лазерные технологии широко используются для обработки материалов на ранних стадиях строительства судов. Первый круизный лайнер отечественного производства планируется спустить на воду к концу 2023 года. China Merchants Group также продвинула строительство центра лазерной обработки в Наньтун Хайтун для своего проекта по производству круизных лайнеров, который включает в себя мощную лазерную резку и сварку. линия по производству тонких пластин. Ожидается, что эта тенденция применения постепенно распространится на гражданские коммерческие суда. У Китая больше всего заказов на судостроение в мире, и роль лазеров в резке и сварке толстых металлических пластин будет продолжать расти.

Аэрокосмические транспортные системы в основном включают ракеты и коммерческие самолеты, при этом ключевым фактором является снижение веса. Это предъявляет новые требования к резке и сварке алюминиевых и титановых сплавов.

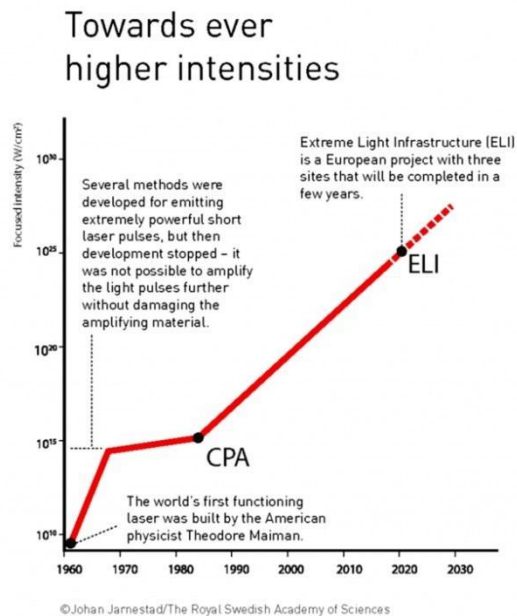
Лазерные технологии необходимы для достижения высокоточных процессов сварки и резки сборки. Появление мощных лазеров мощностью более 10 кВт привело к комплексному обновлению аэрокосмической отрасли с точки зрения качества резки, эффективности резки и интеллектуальных возможностей высокой интеграции. В производственном процессе аэрокосмической промышленности существует множество компонентов, требующих резки и сварки, в том числе камеры сгорания двигателей, корпуса двигателей, каркасы самолетов, панели хвостового крыла, сотовые конструкции и несущие винты вертолетов. К этим компонентам предъявляются чрезвычайно строгие требования к интерфейсам резки и сварки. Airbus уже давно использует мощные лазерные технологии. При производстве самолета A340 все внутренние переборки из алюминиевого сплава свариваются с помощью лазера. Прорывной прогресс достигнут в лазерной сварке обшивок и стрингеров фюзеляжа, которая реализована на Airbus A380. Китай успешно провел испытания большого самолета C919 отечественного производства и поставит его в этом году. Есть также будущие проекты, такие как разработка C929. Можно предвидеть, что в будущем лазеры найдут применение в производстве коммерческих самолетов.

Ядерная энергетика — это новая форма чистой энергии, а США и Франция обладают самыми передовыми технологиями строительства атомных электростанций. На долю ядерной энергетики приходится около 70% поставок электроэнергии во Франции, и Китай сотрудничал с Францией на ранних этапах строительства своих атомных электростанций. Безопасность является наиболее важным аспектом объектов атомной энергетике, и существует множество металлических компонентов с защитными функциями, которые требуют резки или сварки. Независимо разработанная в Китае технология лазерной интеллектуальной сварки MAG с интеллектуальным отслеживанием была массово применена в стальном куполе и стволе футеровки энергоблоков 7 и 8 Тяньваньской атомной электростанции. В настоящее время готовится первый робот для сварки проплавляемых гильз ядерного класса. Компания Teui пошла в ногу с тенденциями развития лазеров и разработала и произвела охладитель сверхмощного волоконного лазера CWFL-60000, который обеспечивает стабильное охлаждение лазерного оборудования мощностью 60 кВт. Благодаря двойной независимой системе контроля температуры он способен охлаждать как высокотемпературную лазерную головку, так и низкотемпературный лазерный источник, обеспечивая стабильную мощность лазерного оборудования и эффективно гарантируя быструю и эффективную работу мощных станков для лазерной резки.

Реализующиеся в ЕС, Китае, США и России проекты по созданию сверхмощных лазерных установок позволяют надеяться на успех в реализации как классического термоядерного синтеза, так и нового, «нетеплового» подхода к созданию реактора ядерного синтеза, который развивается австралийским физиком **Генрихом Хора**. Нынешний век информационных технологий, знаменующий собой трансформацию повседневной жизни с помощью портативных компьютеров, смартфонов, так называемого искусственного интеллекта и т. д., стал возможен благодаря экспоненциальному увеличению вычислительной мощности микросхем, которое началось в 1970-х годах и продолжается сегодня. Этот процесс эмпирически описывается известным законом Мура: количество транзисторных элементов, которые могут быть упакованы в интегральную микросхему, удваивается примерно каждые два года. Однако мало кто знает, что аналогичный процесс происходит и в лазерных

технологиях. Интенсивность световых импульсов, которые могут доставлять лазеры, возрастает по экспоненте с момента создания первого лазера в 1960 году. Благодаря этому стало возможным концентрировать все большее количество энергии в более коротких и более сжатых импульсах, вплоть до одной миллионной от миллиардной доли секунды и меньше. Мы вошли в мир «экстремального света» — формы света, которая, насколько нам известно, никогда не существовала ранее в нашей Солнечной системе.

Новые сверхмощные лазеры с ультракороткими импульсами смогут сделать гораздо больше, чем мы можем себе представить. И, кстати, эти лазеры играют ключевую роль в соблюдении закона Мура благодаря усовершенствованию микролитографии микрочипов и других элементов.



Как видно из вышеприведённого графика, максимальная интенсивность, которую можно получить при фокусировке лазерного импульса, в первые несколько лет росла чрезвычайно быстро. За этим последовало более десяти лет замедление прогресса и резкий взлёт произошел в 1985 году — эта точка на графике помечена аббревиатурой CPA, что совпадает с открытием техники «усиления чирпированных импульсов», о которой я сейчас расскажу. CPA ознаменовал революционный прорыв в области усиления лазерных импульсов. С тех пор каждые пять лет интенсивность лазерного излучения увеличивалась в 10 раз. Лазерная технология позволяет не только концентрировать световую энергию в пространстве, фокусируя луч на крошечной области, но и во времени. В настоящее время для коммерческого использования доступны лазеры, которые производят световые импульсы продолжительностью не более нескольких фемтосекунд. Фемтосекунда — это одна миллионная часть от миллиардной доли секунды. Чтобы получить представление о невероятной краткости фемтосекунды: отношение фемтосекунды к секунде времени соответствует отношению 1 секунды к 770 миллионам лет. В текущих исследованиях длительность импульсов снижается от фемтосекунды до аттосекундной области, что ещё в тысячу раз короче.

Это касается ряда фундаментальных физических процессов, происходящих в отдельных атомах. Совсем недавно впервые стало возможным снимать что-то вроде замедленного видео движения отдельных электронов в атоме.

Как правило, лазерная система с ультракороткими импульсами состоит из лазерного генератора, за которым следует усилитель, который преобразует начальный, относительно слабый импульс в мощный. Однако попытки увеличить энергию импульса натолкнулись на препятствие. При превышении определенной мощности усилитель и оптическая система получают катастрофические повреждения. Среди прочего, достаточно интенсивный лазерный свет имеет тенденцию «самофокусироваться» при прохождении через среду, достигая плотности энергии, которой не может противостоять ни один материал. Однако в середине 1980-х физик **Жерар Муру** и его аспирант **Донна Стрикленд** предложили гениальное решение этой проблемы, известное как «усиление чирпированных импульсов» (CPA). Это изобретение, открывшее новую эру развития лазеров, принесло им Нобелевскую премию по физике в 2018 году. Термин и основная концепция «чирпа» возникли в области военных радиолокационных систем примерно в конце Второй мировой войны и были оперативно разработаны в 1950-х годах. Впервые концепция была рассекречена в 1960 году. Я вкратце набросаю в, чём состоит идея, ибо считаю, что это довольно интересно. Радиолокационные системы, работающие с фиксированной частотой, стремясь увеличить свой диапазон и разрешение, были ограничены необходимостью производить очень короткие импульсы с очень высокой мощностью. При всё большем усилении импульсов компоненты достигали предела, при котором начиналось их повреждение.

В «ЛЧМ-радаре» (радаре линейной частотной модуляции) импульс, излучаемый радиолокационным передатчиком, не имеет фиксированной частоты, а является частотно-модулированным — «чирпированным». В ходе импульса частота уменьшается от выбранного начального значения до более низкого. Тогда импульс становится настолько длинным, что позволяет усилить его до высоких мощностей без повреждения самого передатчика. Сигнал, идущий к объекту и отраженный обратно, будет приходить с такой же частотной модуляцией. (Небольшой сдвиг частоты из-за эффекта Доплера для движущегося объекта, такого как самолет, в большинстве случаев оказывает лишь незначительное влияние.) Теперь начинается фокус: приёмник радара содержит так называемую сетку задержки, спроектированную таким образом, что отраженные высокочастотные сигналы проходят через эту сетку дольше, чем низкочастотные. Когда отраженный частотно-модулированный сигнал проходит через сетку, начальные, высокочастотные волны сигнала задерживаются ровно настолько, чтобы более низкочастотные волны могли их догнать. Это приводит к «накоплению» энергии: импульс, выходящий из сетки задержки, сильно сжимается во времени по сравнению с исходным. Можно понять, что полученный очень короткий импульс содержит ту же информацию об объекте, как если бы исходный импульс был бы столь же коротким. На основе синтезированного импульса приемник радара может измерить точную временную задержку сигнала при движении к цели и от цели, определяя расстояние до неё.

Разница в том, что гораздо более длинный частотно-модулированный сигнал, излучаемый «ЛЧМ-радаром», может иметь гораздо больше энергии, чем может быть передан за короткий импульс. Радар может «видеть дальше» и достигать более высокой точности.

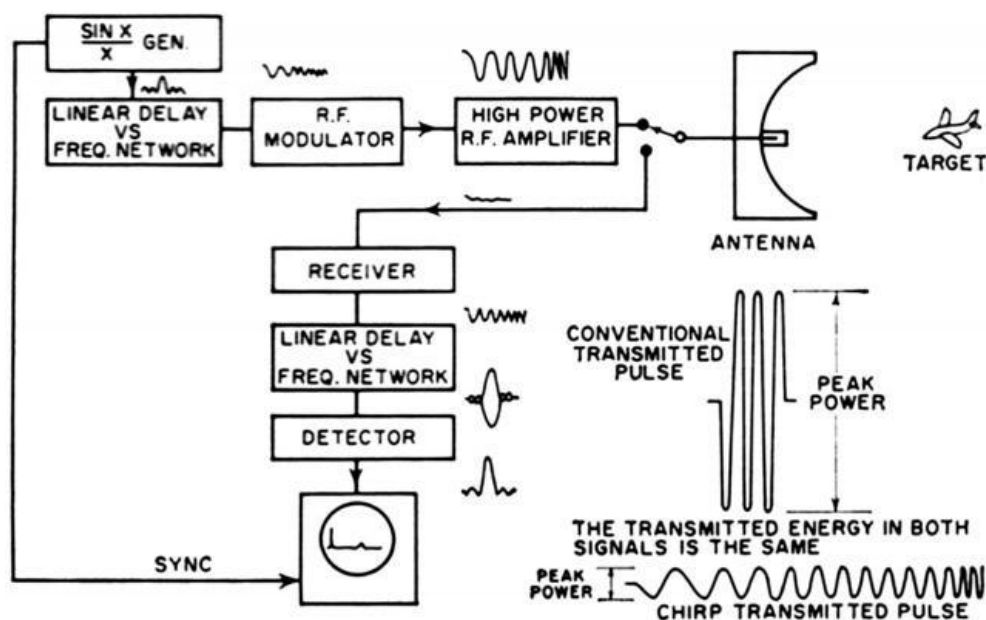


Схема чирпированной радиолокационной системы — изначально военная тайна

В их схеме роль сети задержки в чирпированном радаре играет пара дифракционных решеток. Они разделяют различные частоты света, содержащиеся в коротком импульсе, на «радугу» частот и заставляют более высокие («синие») частоты проходить более длинный путь, чем более низкие («красные») частоты. Это приводит к отставанию более высокочастотных составляющих при прохождении импульса в усилитель. Исходный, слабый, но ультракороткий импульс, создаваемый лазерным генератором, растягивается первой парой дифракционных решеток в более чем 1000-кратный импульс с нарастающей частотой, начиная с красного и заканчивая синим. Результирующий «растянутый» импульс проходит через лазерный усилитель, где полная энергия может быть увеличена до гигантских мощностей без повреждения самого усилителя. Наконец, второй набор дифракционных решеток, работающих в обратном направлении, заставляет длинный импульс «собираться заново» на выходе из системы в один ультракороткий импульс гигантской мощности. Могут быть достигнуты коэффициенты усиления в триллионы или более раз. Благодаря появлению усилителя чирпированных импульсов, лазеры фемтосекундного диапазона с мощностью в диапазоне петаватт — миллион миллиардов ватт — сегодня используются в лабораториях по всему миру.

Когда импульс такого лазера сфокусирован на цель, происходят новые удивительные вещи, явления из области ядерной физики и физики элементарных частиц: трансмутация атомов и другие ядерные реакции, генерация пучков частиц сверхвысокой энергии и разгон макроскопических объектов (плазменных блоков) до скоростей 1000 километров в секунду и более. Поскольку интенсивность лазерного излучения продолжает расти с экспоненциальной скоростью, физики-теоретики мечтают об излучении такой интенсивности, при которой можно было бы непосредственно наблюдать так называемый вакуумный пробой, когда материя

создается «из ничего», только из энергии. Гонка за все более и более высокой мощностью импульса, интенсивностью импульса и количеством «выстрелов», которые могут быть произведены в минуту, идет на международном уровне. Например, проект European Extreme Light Infrastructure (ELI) обещает обеспечить мощность лазера в диапазоне 10 петаватт. Китайская суперинтенсивная сверхбыстрая лазерная установка (SULF) планирует достичь 100 петаватт к 2023 году. США пытаются вернуть себе лидерство с помощью лазерной системы ультракоротких импульсов, эквивалентной Зеттаватту (ZEUS), которая будет построена в Мичиганском университете. ZEUS будет использовать встречные импульсы лазера и электронного луча, чтобы достичь полной мощности порядка зеттаватта (миллиард миллиардов миллиардов ватт).

Однако реализация наиболее выгодной из известных форм термоядерной энергии — нерадиоактивной реакции водород-бор — не зависит от вышеупомянутых мегапроектов. Всё это очень похоже на концепцию реактора, выдвинутую австралийским физиком плазмы **Генрихом Хора**, которая привлекает все большее внимание в последние годы, и потребует немногим больше, чем лазеры того типа, которые уже используются в лабораториях по всему миру. И, наверное, эти лазеры должны быть намного компактнее.

Армия США объявила о формировании первого подразделения, оснащенного лазерным оружием, возможно, первого в своем роде во всем мире. Подразделение расположено в Форт-Силл, штат Оклахома, состоит из четырех боевых машин пехоты Stryker, которые оснащены системой лазерного оружия мощностью 50 кВт, пишет издание Popular Mechanic. Комбинация БМП Stryker и лазерного вооружения получила название DE M-SHORAD. Лазерное оружие, установленное на Stryker, способно поражать БПЛА, ракеты и снаряды в воздухе. DE M-SHORAD фокусирует интенсивный луч лазерного света на цели. Этот луч чрезвычайно горячий, почти как тонко сфокусированный огнемёт. Лазер может сжечь крылья или роторы летающего дрона, в результате чего произойдет структурное разрушение беспилотника. Он также может уничтожить дрон, сжигая бортовую схему, ослепляя любые камеры, которые операторы используют для управления дроном, или, в случае дронов, в которых используются двигатели, работающие на топливе, вызывать возгорание топлива. Система оснащена бортовым генератором, который обеспечивает питание лазера, и оборудованием для обнаружения, отслеживания и наведения на цели. В результате получается автономная система ПВО, не требующая сопровождения машин поддержки, которая может развертываться и обеспечивать воздушную защиту других маневренных сил. В ходе испытаний в мае 2022 года DE M-SHORAD успешно сбивала ракеты и минометные снаряды. Хотя стоимость системы DE M-SHORAD высока, стоимость одного выстрела равна стоимости дизельного топлива для выработки необходимой электроэнергии для питания оружия. Это также означает, что пока у лазера есть топливо для питания генератора, он может продолжать стрелять.

Исследователи из Национального университета оборонных технологий в Китае утверждают, что преодолели самую большую проблему при создании лазерного оружия — перегрев. Предполагается, что новая разработка системы охлаждения позволит поддерживать работу высокоэнергетического лазера «бесконечно». Новая китайская система охлаждения использует газ, проходящий через оружие, для отвода избыточного тепла и позволяет бесконечно стрелять лазерными лучами без потери мощности или деформации. Высокоэнергетические лазерные системы сегодня применяют для вывода из строя беспилотных

летательных аппаратов, но оружие перегревается при каждом использовании, что вынуждает операторов отключать его для охлаждения. Британский военный эксперт Стив Уивер заметил, что если ученые в Китае действительно достигли подобного технологического прорыва, то они во многом превзойдут США, которые активно развивали технологию лазерного оружия.

Подобные вооружения разработаны и в Израиле. ЦАХАЛ планирует разместить лазерные системы противоракетной обороны «Щит света» («Маген Ор») на границе с сектором Газы в 2025 году, а на границе с Ливаном – в 2027 году. Введение в строй систем, предназначенных для борьбы с ракетами малого радиуса действия и с минометными снарядами, и имеющих низкую стоимость отдельного выстрела (в отличие от системы ПРО «Железный купол», каждый пуск которой стоит десятки тысяч долларов), должно кардинально изменить ситуацию с ракетной угрозой Израилю. В марте 2022 года министерство обороны Израиля представило новую лазерную систему «Щит света», а в апреле того же года опубликовало видео с испытаний системы, способной сбивать на расстоянии до десяти километров различного рода цели – беспилотные летательные аппараты, минометные снаряды и ракеты и противотанковые ракеты. В декабре 2022 года американский оборонный концерн Lockheed Martin присоединился к израильскому оборонному концерну «Рафаэль» в работе над проектом по разработке системы «Маген Ор». В мае 2023 года концерн «Рафаэль» представил в Сингапуре морскую версию системы «Маген Ор».