

**Почему лазерный луч — мечта радиоинженера или почему без  
радиотехнических компонентов лазер оставался бы просто источником  
непрерывного света**

Н.Л. Истомина<sup>1</sup>, А.Б. Люхтер<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российская академия наук, Отделение физических наук  
119991, Москва, Ленинский проспект, дом 32 А  
E-mail: photonics@grad.ac.ru

<sup>2</sup> Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: luhter@vlsu.ru

*Форма лазерного импульса - это ключевой параметр в современных лазерных методах исследования и лазерных технологиях. Управление временным профилем энергии лазерного пучка позволяет программировать термические процессы в зоне его взаимодействия с материалом, увеличивать разрешающую способность лидарных или навигационных приборов. В импульсе важно определить соотношение между временной длиной фронта нарастания и «хвоста». Без радиотехнических компонентов лазер оставался бы просто источником непрерывного света. Именно радиоэлектроника задает лазерному лучу временную структуру.*

*Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, радиофотоника, лазерные технологии, лазеры с ультракороткими импульсами, форма лазерного импульса*

**Why is a laser beam a radio engineer's dream, or why without radio components, a  
laser would remain just a source of continuous light**

N.L. Istomina<sup>1</sup>, A.B. Lyuhter<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Academy of Sciences, Department of Physical Sciences.

<sup>2</sup> Vladimir State University.

*The shape of the laser pulse is a key parameter in modern laser research methods and laser technologies. Controlling the time profile of the laser beam energy allows programming thermal processes in the area of its interaction with the material, increasing the resolution of lidar or navigation devices. In an impulse, it is important to determine the relationship between the time length of the rise front and the "tail". Without the radio components, the laser would remain just a source of continuous light. It is radio electronics that sets the time structure of the laser beam.*

*Keywords: photonic integrated circuits, radiophotonics, laser technologies, ultrashort pulse lasers, laser pulse shape*

**I. Почему лазерный луч — мечта радиоинженера**

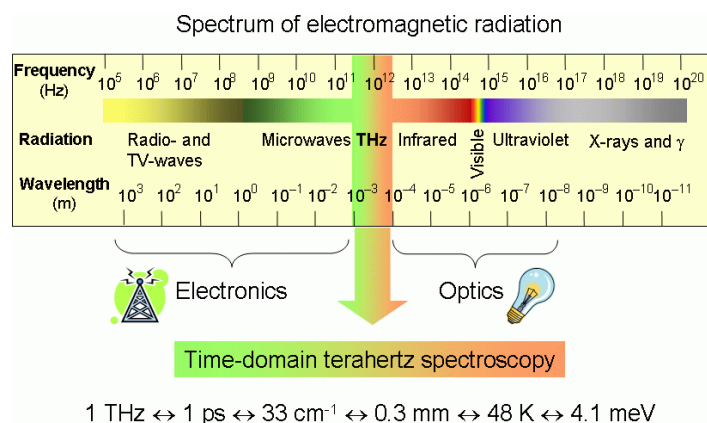
Любые инструменты связаны с социальными, экономическими и иными обстоятельствами эпохи, в которой они переживают расцвет. В разное время популярностью в решении инженерных задач пользуются разные технологии, а какими-то и вовсе пренебрегают. Так в 1896 году на знаменитой Всероссийской художественно-промышленной выставке в Нижнем Новгороде радиоприемник, изобретенный А.С. Поповым, был удостоен только диплома II степени, как и картина «Ковер-самолет» художника В.М. Васнецова, признанная объектом низкой

художественной ценности. Диплом первой степени тогда получили металлические сетчатые конструкции инженера В.Г. Шухова.



Когда появляются новые индустриальные технологии, тогда появляются и новые инструменты. Умение ими пользоваться отвечает уровню технологической независимости. Для современного радиста лазер — это не инструмент фантастических фильмов и не просто прибор для резки металла. Это самый высокочастотный, дальнобойный и информативный инструмент связи, работающий по фундаментальным законам радиотехники.

Для радиоинженера мир электромагнитных колебаний привычен и понятен. Мы знаем, как генерировать синусоидальный сигнал, как работают гетеродины, смесители, резонаторы и антенные фидеры. Но если поднять рабочую частоту передатчика до сотен терагерц классическая схемотехника на транзисторах упрется в физический тупик. Именно в этой точке на сцену выходят лазеры — устройства, которые делают со световыми волнами ровно то же самое, что радиопередатчики делают в КВ, УКВ или СВЧ диапазонах.



## Шкала электромагнитных волн

По своей сути лазер — это оптический квантовый генератор, работающий по принципам, которые интуитивно понятны любому радисту. Свет как сверхвысокочастотное радио: лазер — это идеальный передатчик для радиста, тот же генератор, но на терагерцах. Терагерцевый диапазон (примерно 0,1–10 ТГц) занимает уникальное положение на шкале электромагнитного спектра — между инфракрасным излучением и радиоволнами. Он сочетает в себе свойства обеих областей: обладает большой проникающей способностью, как радиоволны, и легко фокусируется, как инфракрасное излучение.

Чтобы сопоставить эти технологии, достаточно взглянуть на их структурные аналоги:

Активная среда вместо колебательного контура. В радиосвязи частоту задают емкость и индуктивность. В лазере частоту (длину волны) определяет сама структура рабочего вещества (газ, кристалл или полупроводник). Энергия накачки переводит атомы в возбужденное состояние. Это аналог подачи напряжения питания на транзисторный каскад.

Оптический резонатор вместо объемного резонатора СВЧ: лазерный луч рождается между двумя зеркалами. Одно зеркало глухое, второе — полупрозрачное (через него выходит полезный сигнал). Расстояние между зеркалами строго кратно длине волны, что обеспечивает положительную обратную связь, необходимую для незатухающих колебаний.

Вынужденное излучение вместо усиления сигнала: пролетающий фотон заставляет возбужденный атом сбросить энергию и испустить точно такой же фотон — с той же частотой, фазой и направлением. Для радиста это классический пример синфазного усиления сигнала.

Обычная светодиодная лампочка излучает «белый шум» — смесь хаотичных фаз и частот, аналогичную треску в ненастроенном радиоприемнике. Лазер же выдает сигнал со свойствами, которые критически важны для дальней связи:

- Высочайшая монохроматичность (стабильность частоты). Лазерный «передатчик» работает на одной фиксированной частоте с невероятно узкой полосой пропускания.
- Строгая когерентность (синфазность). Все излучаемые фотоны идут «шаг в шаг», сохраняя постоянство фазы во времени и пространстве. Благодаря этому световые волны можно модулировать и демодулировать так же, как радиосигналы.
- Узкая диаграмма направленности. Сигнал не рассеивается в пространстве, а попадает точно в цель на огромные расстояния.

- Переход в оптический диапазон позволил решить главную проблему радиосвязи — дефицит полосы частот.

Для передачи любого высокочастотно модулированного сигнала (в аналоговом или цифровом формате) необходимо, чтобы несущая частота опорного сигнала была существенно выше частоты информационной модуляции. Несущая частота света приблизительно  $10^{15}$  Гц, а частоты информационной модуляции не превышают  $10^{11}$  Гц. Это на четыре порядка ниже световой частоты. Поэтому свет является идеальной несущей. Генератором светового опорного сигнала ( $10^{15}$  Гц) служит обычно лазер, а информационная модуляция осуществляется либо прямой модуляцией лазера (в формате амплитудной модуляции до частот порядка  $10^{10}$  Гц), либо с помощью электрооптического модулятора для более высоких частот и более сложных форматов модуляции.

Для связи между наземными объектами или внутри воздушных или подводных бортов применяют волоконные световоды, обладающие характеристиками, недостижимыми при использовании медных проводов.

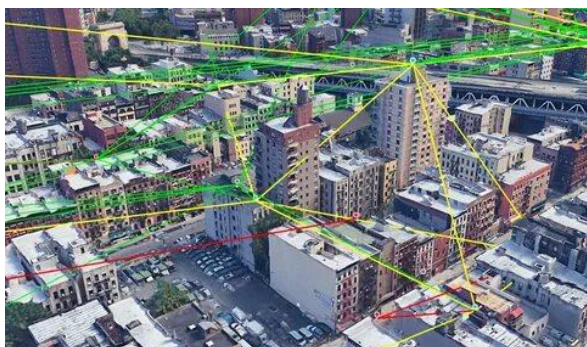


**Волоконно-оптические линии связи**

ВОЛС (волоконно-оптические линии связи) – это та же проводная связь, но вместо медного кабеля используется кварцевое стекло, а вместо электрического тока — лазерное инфракрасное излучение. Несущая частота в районе  $193$  ТГц позволяет передавать терабиты данных в секунду по одному тонкому волокну без электромагнитных помех и наводок.

Передача данных лазерным лучом применяется там, где нельзя проложить кабель или не дают частоты для радиорелейных линий используется через атмосферную оптическую связь (FSO – Free Space Optics). Лазерные мосты незаменимы для связи между зданиями или подвижными объектами. Оптическая лазерная связь (FSO) используется для создания высокоскоростных каналов передачи данных, как на орбите, так и на земле. В космосе лазерные межспутниковые соединения (ISL) обеспечивают передачу данных между спутниками с пропускной способностью до сотен Гбит/с, минимизируя задержки. В глубоком космосе классическая СВЧ-связь требует гигантских антенн и сотен ватт мощности из-за затухания сигнала. Лазерные терминалы на спутниках позволяют передавать огромные массивы научной информации, используя компактное оборудование. На земле FSO применяется для соединений в условиях прямой видимости, например, между зданиями или дата-центрами. Лазерная связь также повышает безопасность каналов благодаря узкой направленности сигнала.





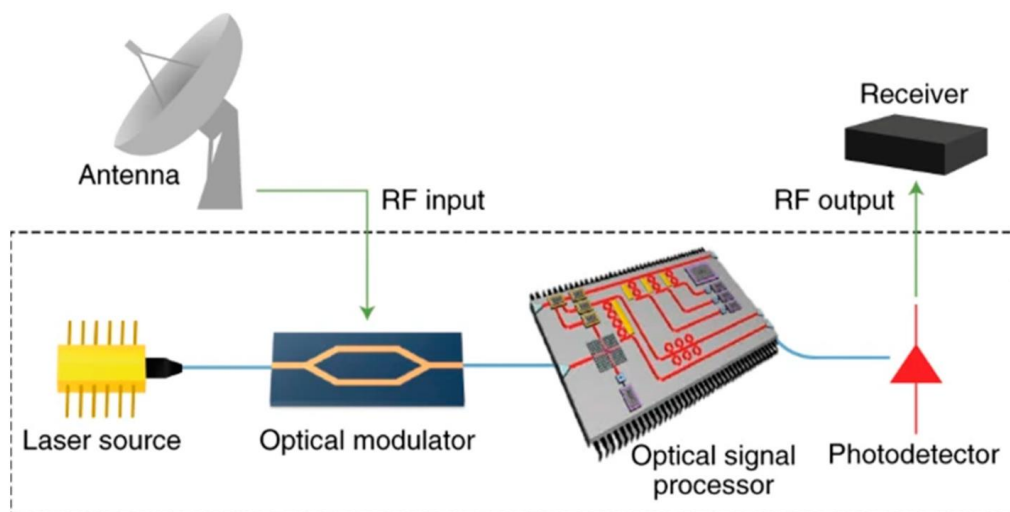
**Оптическая лазерная связь (FSO)**

Стремление обеспечить безопасность страны определило появление в фотонике направления радиофотоника. Радиоэлектронные системы требуют всё больших скоростей и частот, но сталкиваются с перегревом, затуханием сигналов и электромагнитными помехами. Решением этих проблем стала радиофотоника — гибридная дисциплина, объединяющая радиоэлектронику и оптику. Радиофотоника обладает преимуществами не столько в быстродействии, сколько в возможности работать в жестких условиях подавления радиосвязи. Радиофотоника (Microwave Photonics) — это научно-техническое направление, изучающее взаимодействие оптического (светового) излучения и радиочастотных/СВЧ-сигналов для задач приема, передачи и обработки информации. Классическая микроэлектроника, основанная на движении электронов по медным проводам и кремниевым полупроводникам, практически достигла своих физических пределов.

### **Как это работает?**

В обычной электронике носителем информации является электрон. В фотонике его место занимает фотон — квант света. Фотоны не имеют массы и электрического заряда, благодаря чему они могут перемещаться со скоростью света и не взаимодействовать друг с другом, исключая наводки.

Процесс обработки сигнала в радиофотонике выглядит следующим образом:



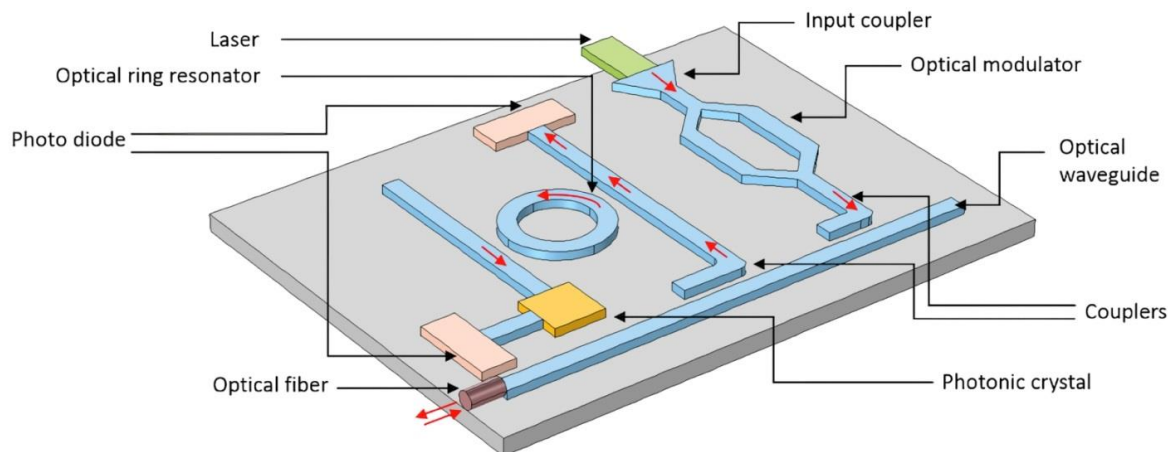
1. Преобразование: Входной высокочастотный радиосигнал (например, от антенны) поступает на электрооптический модулятор. Электрооптический модулятор (ЭОМ) — это устройство, которое управляет параметрами оптического излучения (фазой, поляризацией, интенсивностью или амплитудой) с помощью электрического сигнала.

Он основан на электрооптическом эффекте — изменении оптических свойств материала (показателя преломления) под действием внешнего электрического поля.

2. Модуляция световой волны радиосигналом: Модулятор «накладывает» этот радиосигнал на несущую световую волну от лазера.

3. Обработка и передача: Световой сигнал мгновенно передается по волоконно-оптическому кабелю или обрабатывается специальными оптическими чипами.

4. Обратное преобразование: Сверхбыстрый фотодетектор принимает свет и превращает его обратно в чистый радиосигнал для конечного устройства.



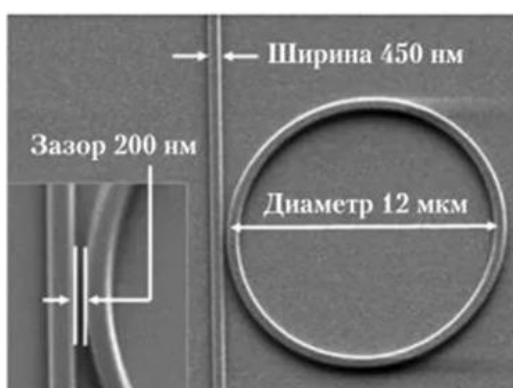
Фотонные чипы направляют и обрабатывают свет в микроскопических каналах, называемых волноводами, которые нанесены на пластину, подобно тому, как электронные микрочипы направляют электричество. Фотонные чипы, уже широко используемые в телекоммуникациях, позволяют миниатюризировать сложные функции, для которых раньше требовались гораздо более крупные системы.

### **Ключевые преимущества радиофотоники перед электроникой**

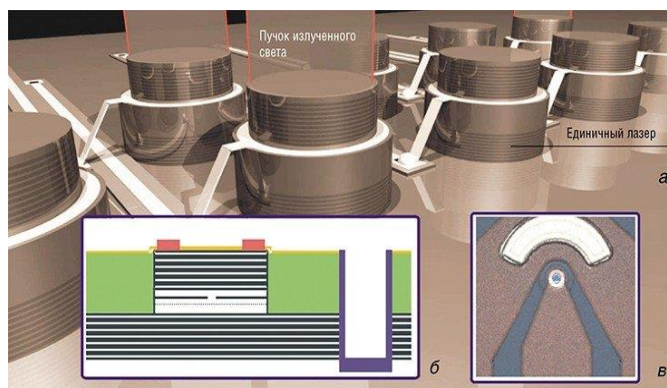
- Огромная полоса пропускания. Световые волны имеют частоту на порядки выше, чем радиоволны. Это позволяет передавать и обрабатывать терабайты данных в секунду.
- Минимальное затухание. Внутри оптического волокна световой сигнал может преодолевать десятки километров практически без потерь. Медный коаксиальный кабель теряет мощность сигнала уже через несколько метров.
- Помехозащищенность. Свет равнодушен к мощным электромагнитным полям, грозам или промышленным наводкам. Сигнал невозможно перехватить или заглушить обычными радиосредствами.
- Снижение веса и габаритов. Волоконная оптика значительно легче и тоньше тяжелых медных кабелей, что критически важно для авиации и космических аппаратов.
- Технология радиофотоники уже активно внедряется в самые наукоемкие отрасли:
  - Связь нового поколения (5G / 6G). Радиофотоника позволяет базовым станциям мобильной связи обрабатывать огромные потоки данных на сверхвысоких частотах без задержек.
  - Радиолокация и радары. Фотонные радары (РОФАР) способны создавать детализированные трехмерные изображения объектов на расстоянии сотен километров, легко распознавая технологии «стелс».

- Космическая и авиационная техника. Замена бортовой кабельной сети на оптику снижает вес самолетов и спутников на сотни килограммов, повышая их надежность.
- Сверхточные измерения. На базе радиофотоники создаются оптические генераторы частоты, которые используются в атомных часах и системах спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС).

А создание радиофотонных чипов решает очень многие задачи быстрого действия, снижения веса, безопасности передачи информации. Преобразование электронных сигналов в оптические сигналы и обратно с помощью фотонных интегральных схем (ФИС) позволяет увеличить скорость обработки и передачи данных, уменьшить массогабаритные характеристики функциональных узлов систем управления навигационными системами.



Элемент ФИС



**Оптическая система параллельной передачи информации: а) схема на основе массива лазеров с вертикальным резонатором; б) схема единичного лазера (поперечный разрез); в) оптическая микрофотография единичного лазера (вид сверху)**

Сейчас формируется концепция использования физических платформ связи наземного и орбитального базирования. Оптическая волоконная связь формирует магистральную инфраструктуру глобальной сети, обеспечивая высокоскоростное соединение между наземными станциями спутниковой связи, центрами обработки данных и конечными пользователями. Она служит основой для передачи больших объемов данных с минимальными задержками.

Радиосвязь остается ключевой технологией для обеспечения мобильности и широкого покрытия, предоставляя доступ к сети в удаленных регионах и поддерживая приложения реального времени, такие как управление беспилотными аппаратами и устройствами Интернета вещей (IoT). Она также играет роль резервного канала для повышения надежности системы.

Оптическая лазерная связь (FSO) используется для создания высокоскоростных каналов передачи данных, как на орбите, так и на земле. В космосе лазерные межспутниковые соединения (ISL) обеспечивают передачу данных между спутниками с пропускной способностью до сотен Гбит/с, минимизируя задержки. На земле FSO применяется для соединений в условиях прямой видимости, например, между зданиями или дата-центрами. Лазерная связь также повышает безопасность каналов благодаря узкой направленности сигнала.

Основная задача многослойной концепции — эффективное управление потоками данных с оптимизацией переключения между технологиями в зависимости от погодных условий, требований к пропускной способности и регулирования (например,

распределения частотного спектра или орбитальных позиций). Беспроводная интеграция достигается за счет использования программно-определяемых сетей (SDN), протоколов маршрутизации и координации через центры обработки данных, которые обеспечивают обработку, синхронизацию и распределение данных.

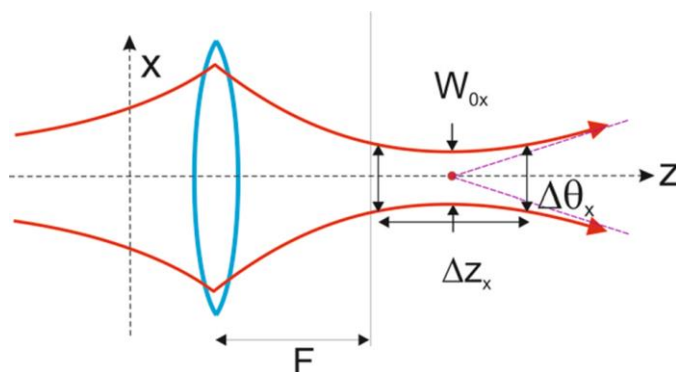
Ограничения, такие как чувствительность лазерной связи к погодным условиям или высокая стоимость прокладки оптоволоконной линии, компенсируются резервированием и гибридным подходом, обеспечивающим надежность и масштабируемость системы.

А теперь уделим внимание самим конструкциям модулей и их элементам, которые обеспечивают надежность работы информационных систем в экстремальных эксплуатационных условиях в условиях космоса и наземного базирования.

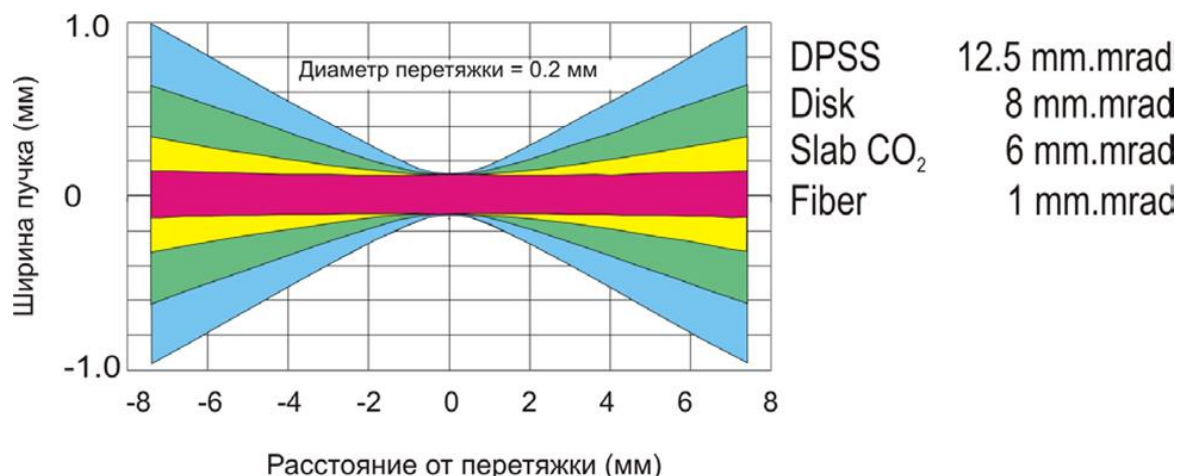
## II. Почему без радиотехнических компонентов лазер оставался бы просто источником непрерывного света

### Зачем управлять формой импульса?

Надо учитывать особенности лазерного пучка. Дело в том, что лазерный пучок имеет форму каустики и никогда не может фокусироваться в точку. В фокальной плоскости он имеет минимальный размер диаметра, который называется перетяжкой.



У разных типов лазера при одном размере перетяжки будет разная расходимость



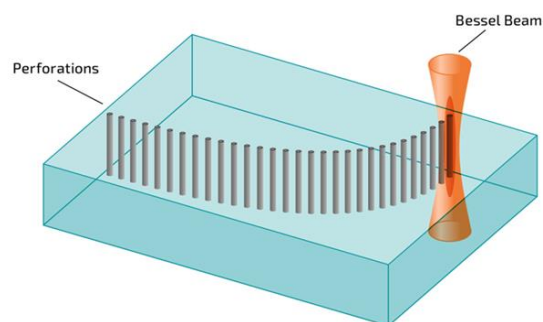
Для решения разных задач используются лазеры с разной расходимостью.



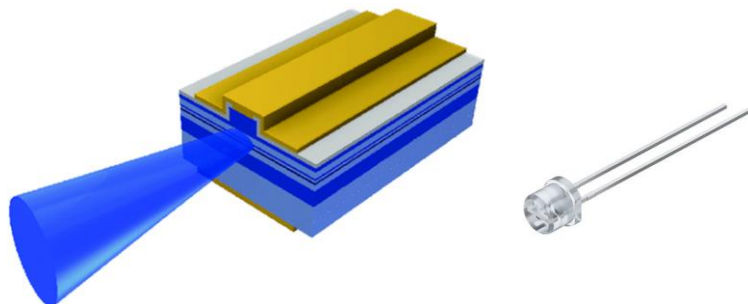
**Диодные и твердотельные лазеры для облакомеров**



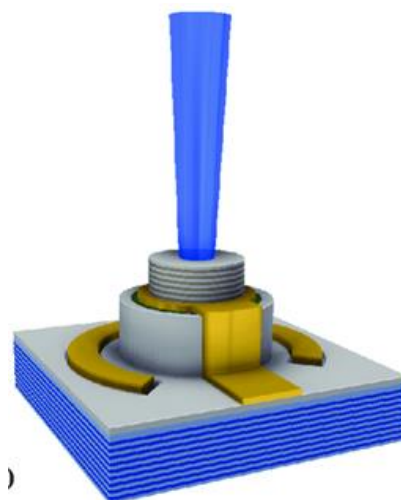
**Волоконные лазеры для обработки материалов**



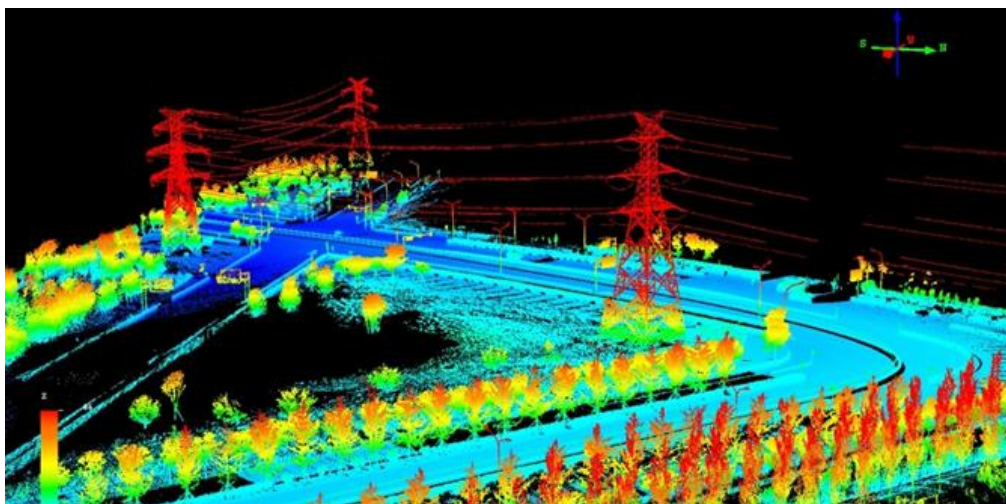
**Полупроводниковые диодные лазеры для лидаров, встраиваемых в автономные транспортные средства**



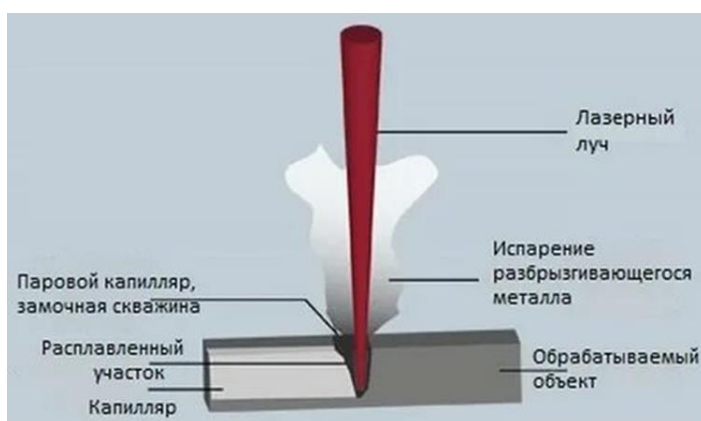
**Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором VCSEL-лазеры для радиофотоники**



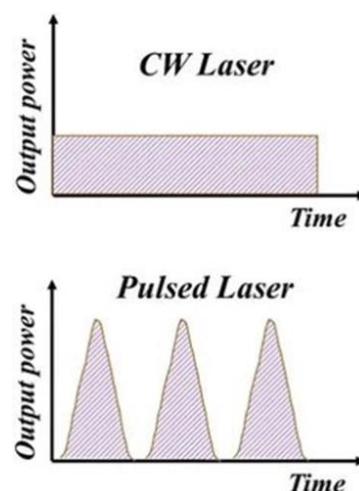
В современных лазерных технологиях, будь то лидарные измерения для автономного транспорта или лазерная микрообработка, важно управлять мощностью, частотой и длительностью излучения. Важнейшим инструментом инженеров стало профилирование импульса — изменение плотности энергии лазера во времени на протяжении микро, нано-, пико- или фемтосекунд. Например, для лидаров, используемых для автономного транспорта, сокращение длительности лазерного импульса является необходимым условием повышения разрешающей способности технического зрения. А форма импульса должна обеспечивать резкое увеличение пиковой мощности.



В лазерной технике и лазерных технологиях обработки материалов соотношение между длительностью (временной длиной) переднего фронта (нарастания) и заднего фронта (хвоста) импульса определяет, как именно энергия передается материалу.



**Процессы, сопровождающие взаимодействие лазерного излучения с веществом**



**Режимы излучения: непрерывный и импульсный**

Правильный выбор формы импульса позволяет плавить, испарять или резать материалы без термических повреждений соседних зон. Длина вспышки определяет технологию — можно сделать импульс длинным (чтобы сильно нагреть и расплавить

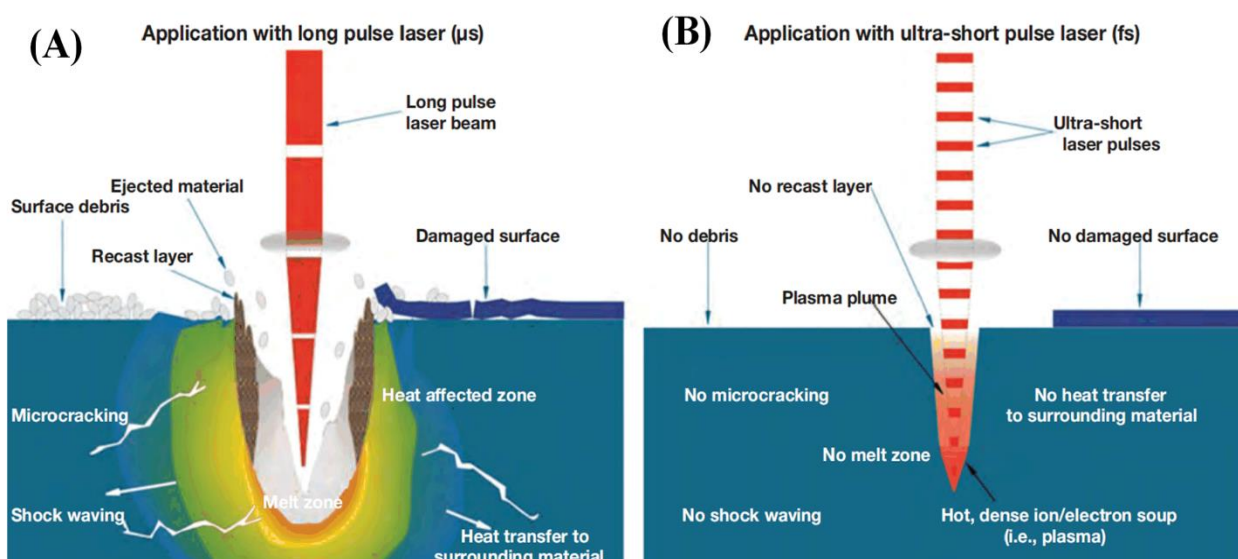
металл) или ультракоротким (чтобы испарить микроскопический слой, не нагревая саму деталь).

Форма лазерного импульса (Pulse Shaping) — это ключевой параметр в современных лазерных технологиях микрообработки, резки, сверления и сварки материалов. Управление временным профилем энергии лазерного луча позволяет программировать термические процессы в зоне воздействия, исключая дефекты и повышая скорость производства в разы.

Если подать всю энергию слишком быстро, произойдет микровзрыв, который выбросит капли жидкого металла, оставив рваные края и поры.

Если подать энергию слишком медленно, тепло уйдет вглубь детали, вызвав коробление, окисление и появление зоны термического влияния.

Управление формой импульса решает эту дилемму, дозируя тепло строго в нужные микросекунды.



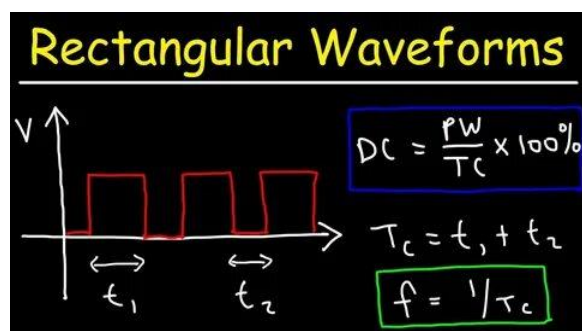
### **Влияние длительности импульса на результаты процесса взаимодействия лазерного пучка с материалом**

В производстве радиотехнических компонентов наряду с классическими инструментами электронного машиностроения высокий потенциал применений имеют лазеры с ультракороткими импульсами (УКИ-лазеры): в операциях деме­таллизации, скрайбирования, обработки сырой керамики, операций мезаструктурирования полупроводниковых материалов. Высокая вариативность режимов обработки является главным преимуществом УКИ-лазеров (производство компании VPG Laserone, Фрязино, Моск. обл.).

## Основные формы лазерных импульсов и их назначение

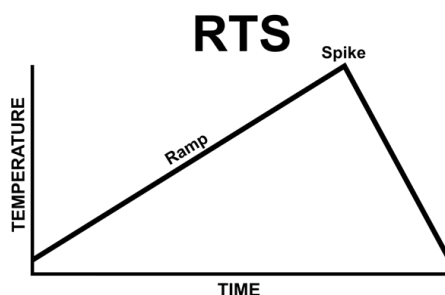
Лазерные системы позволяют формировать несколько базовых профилей.

### 1. Прямоугольный импульс (Square / Rectangular Pulse)



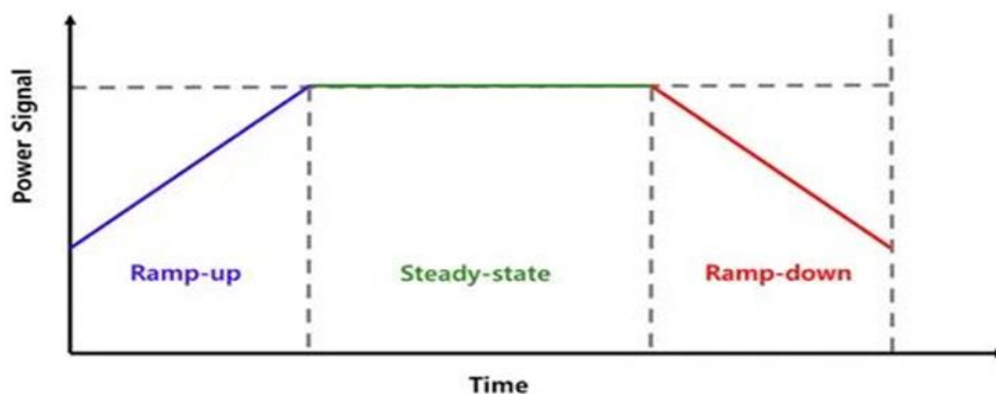
Профиль: Мгновенный подъем до максимальной мощности, удержание уровня и мгновенный спад. Такой импульс обеспечивает стабильное и равномерное тепловложение на протяжении всего времени воздействия. Применяется при резке металлов средней толщины, лазерной маркировке и поверхностной закалке.

### 2. Импульс с «пиковым» стартом (Ramp-Up / Spike Pulse)



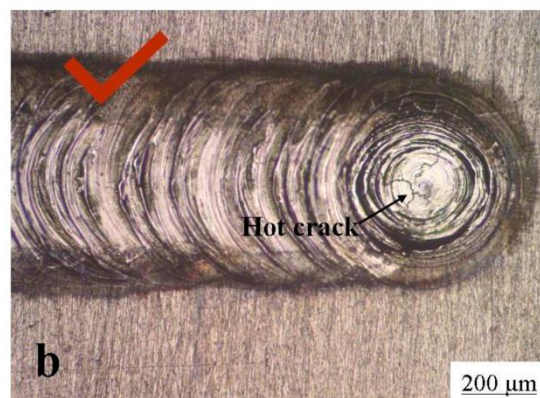
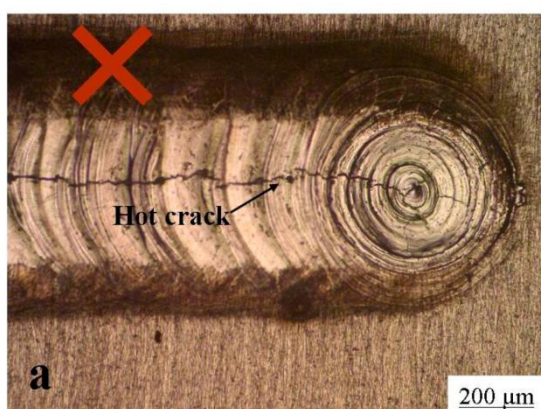
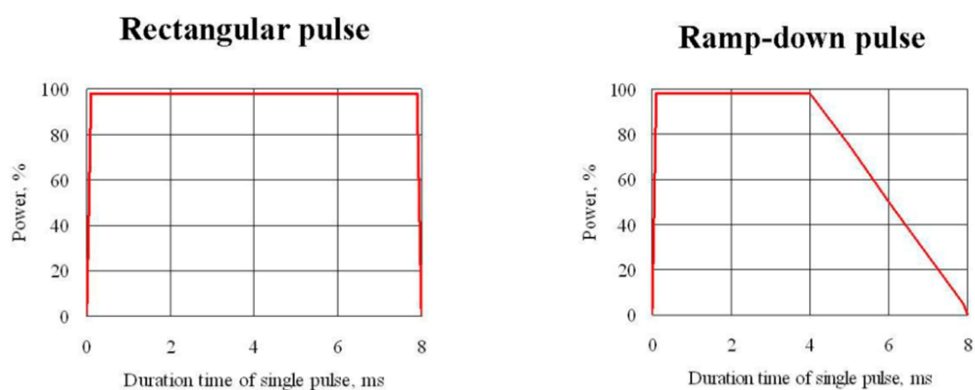
Профиль: Мощный короткий пик в самом начале, переходящий в более низкую полку. Начальный высокоэнергетический пик мгновенно разрушает оксидную пленку и снижает коэффициент отражения материала (особенно у меди, алюминия, золота). Дальнейший «хвост» импульса поддерживает плавление при гораздо меньшей мощности. Применяется при сварке высокоотражающих цветных металлов, прецизионном сверлении (прошивке) отверстий.

### 3. Импульс с плавным угасанием (Ramp-Down / Decaying Pulse)



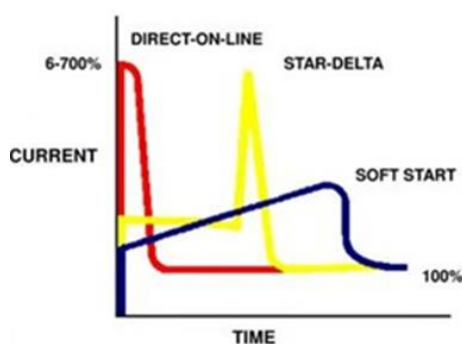


Профиль: Быстрый взлет мощности и ее постепенное, контролируемое снижение к концу импульса. Плавное снижение энергии обеспечивает медленное остывание сварочной ванны. Это предотвращает появление трещин из-за резких внутренних напряжений и исключает образование усадочных раковин (кратеров) в точке выключения лазера. Применение: Финишные этапы точечной лазерной сварки герметичных швов, обработка хрупких материалов (керамика, стекло).



От выбора формы импульса зависит результат обработки. Контролируемая форма импульса исключает появление микротрещин в жаропрочных сплавах.

#### 4. Мягкий старт (Soft Start / Saddle Pulse)



Профиль: Медленный подъем мощности, затем пик и спад (в форме седла). Материал сначала плавно прогревается, подготавливая зону обработки, а основной импульс производит глубокое проплавление. Применяется в технологиях, где идет

обработка композитов или многослойных материалов, где резкий тепловой удар может вызвать расслоение.


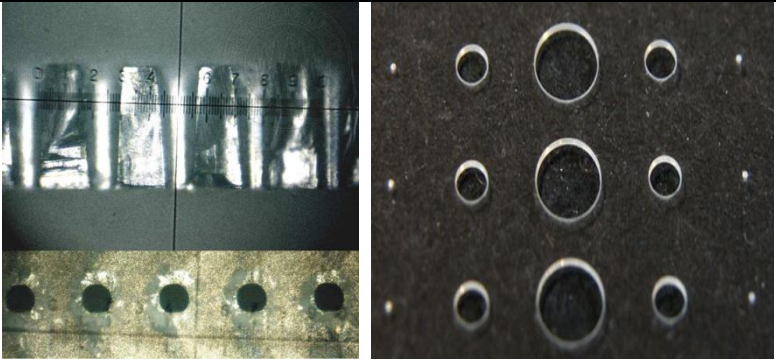
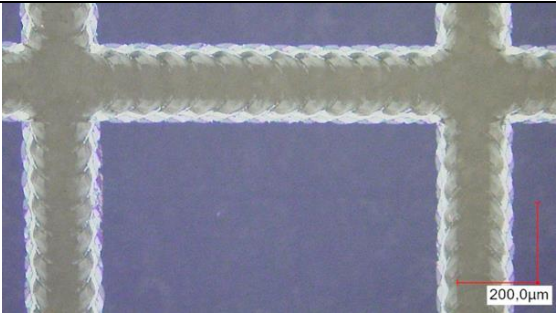
#### 5. Пакетные импульсы (Burst Mode) — вершина микрообработки

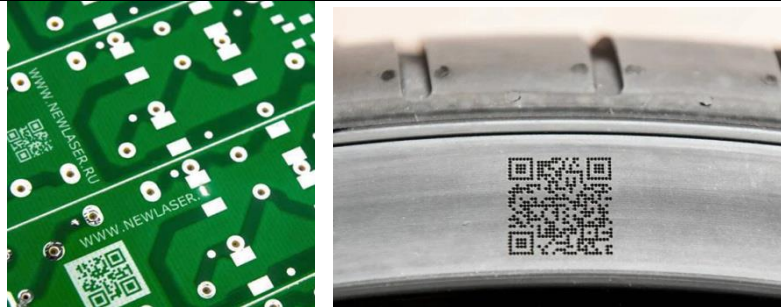

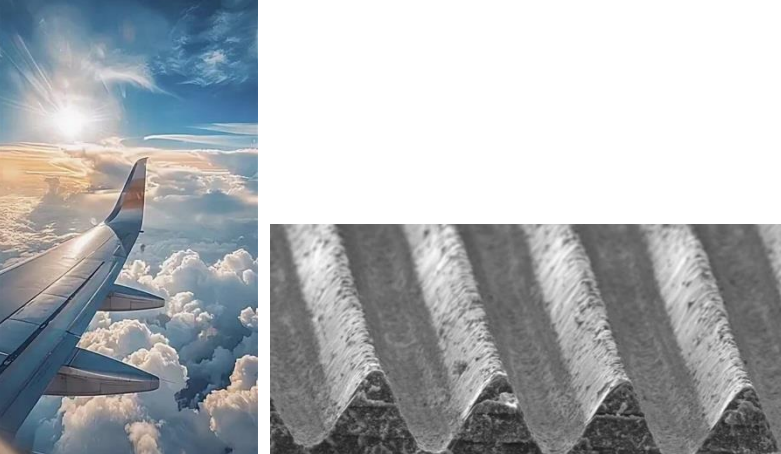
В ультракоротких лазерах (пико- и фемтосекундных) активно применяется режим пакетов (Burst Mode). Вместо одного мощного импульса лазер выдает серию («обойму») суб-импульсов с экстремально малой задержкой между ними (наносекундный диапазон).

«Охлаждающий» эффект пакета: Первый микроимпульс испаряет тончайший слой материала, а второй и третий подхватывают облако плазмы и продолжают углубление. Происходит так называемая абляция — чистый переход вещества из твердого состояния в газ, минуя жидкую фазу. Как результат — идеально гладкие края без грата, наплывов и следов горения.

На практике применяется в производстве электроники при лазерной сварке медных и алюминиевых шин в аккумуляторах. Без импульсов с «пиковым стартом» сварить медь без брака невозможно — она просто отражает лазерный луч.

### Лазерные технологии обработки материалов

Резка стекла	
Прошивка отверстий	
Структурирование поверхности	

<b>Маркировка изделий</b>	
<b>Лазерное скрайбирование</b>	
<b>Функционализация поверхности</b>	

Выбор и настройка формы лазерного импульса гибкий цифровой инструмент прецизионной точности. Без радиотехнических компонентов лазер оставался бы просто источником непрерывного света. Именно радиоэлектроника задает лазерному лучу временную структуру. В импульсе важно определить соотношение между временной длиной фронта нарастания и «хвоста».

#### Естественное соотношение (без настройки)

Если лазер работает в своем «природном» режиме, импульс всегда получается несимметричным. Передний фронт (нарастание) всегда очень короткий и крутой. Лазер накапливает энергию, затвор открывается, и происходит лавинообразный выброс фотонов. Нарастание занимает от долей наносекунды до нескольких наносекунд. Задний фронт (хвост) всегда более длинный и пологий. Энергия в лазерной среде заканчивается не мгновенно, а затухает по экспоненте. Поэтому в естественной среде хвост импульса обычно в 2–5 раз длиннее, чем время нарастания фронта.

При управлении импульсом рассматривают разные варианты:

#### Симметричный импульс (1 : 1)

Длина фронта = Длина хвоста (Форма: прямоугольник или идеальная трапеция). Такой импульс обеспечивает абсолютно равномерное термическое воздействие на материал от первой до последней наносекунды. Применяется для чистой резки и стандартной маркировки.

*Быстрый старт и длинный хвост (1 : 4 или 1 : 10)*

Длина фронта << Длина хвоста (форма: «**акулий плавник**» или импульс с пиком). Короткий и крутой передний фронт обладает колоссальной пиковой мощностью. Он нужен, чтобы мгновенно пробить оптическое отражение материала (например, блестящей меди или золота) или разрушить оксидную пленку. Пологий длинный хвост затем мягко плавит обнаженный металл, не вызывая микровзрывов и разбрызгивания.

*Плавный старт и обрубленный хвост (4 : 1 или 10 : 1)*

Длина фронта >> Длина хвоста (форма: **обратный «акулий плавник»** или треугольник с обрывом). Длинный передний фронт плавно и постепенно разогревает материал, подготавливая его. В конце происходит пиковый удар, после чего лазер мгновенно (за доли наносекунды) выключается. Отсутствие хвоста критически важно для деликатных материалов (пластик, кремниевые платы): если бы у импульса был длинный затухающий хвост, лишнее тепло успело бы уйти в стороны и оплавить края зоны обработки.

Для управления формой и длительностью лазерного импульса применяются специализированные высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) радиотехнические устройства, способные работать на частотах от сотен мегагерц до десятков гигагерц. Они преобразуют управляющие электрические радиосигналы в оптические.

Лазерная техника меняется. Если раньше тепловые процессы нагревания вещества под действием лазерного излучения описывалось в терминах равновесных процессов, то при высоких скоростях нагрева, которые возникают при воздействии ультракоротко импульсного лазерного излучения, динамика процессов меняется. Мы имеем дело с нелинейной оптикой, когда поглощение зависит от изменения мощности нагрева. Функция распределения плотности мощности меняется во времени от импульса к импульсу.

Лазеры с ультракороткими импульсами (УКИ-лазеры) имеют высокий потенциал применений в производстве наряду с классическими инструментами радиоэлектронного приборостроения. Высокая вариативность режимов обработки является главным преимуществом УКИ-лазеров (в России волоконные лазеры производит компания VPG Laserone, Фрязино, Московская обл.).

Степень новизны конструкторских решений для систем управления навигационными, радиолокационными, телекоммуникационными системами не обязательно обеспечит минимизацию их себестоимости. Об этом свидетельствует мировой опыт. Но внедрение инновационных фотонных технологий в производство должно способствовать достижению необходимых технических параметров систем, что позволит преодолеть угрозу технологического отставания отечественной экономики и повысит потенциал парирования угроз безопасности страны.