

УДК 535.8

А.И. ЦаплинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ПЕРСПЕКТИВЫ ФОТОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Рассмотрены исторические аспекты развития энергии электромагнитного излучения. Возможности концентрации энергии и ее передачи возросли с развитием оптоволоконных световодов. Показана динамика увеличения скорости передачи информации, роста выходной мощности непрерывных волоконных лазеров. Прогрессирующие темпы развития оптоволоконной техники могут привести к тому, что преобразование и перенос энергии в виде потока инфракрасного излучения (фотонов) могут оказаться в некоторых случаях экономически более выгодными по сравнению с переносом электроэнергии.

Ключевые слова: энергия фотона, оптические волокна, волоконный лазер, брэгговская решетка.

A.I. Tsaplin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PROSPECTS OF PHOTON ENERGY

The historical aspects reviewed of the development of energy of electromagnetic radiation. The possibility of concentration of energy and its transfer increased with the development of the fiber optic light guides. Dynamics of increasing the speed of information transfer and growth of output power of continuous fiber lasers are shown. Progressive the pace of development of fiber-optic equipment may cause the conversion and transfer of energy in the form of a stream of infrared radiation (photons) can be in some cases economically more beneficial compared with electricity.

Keywords: photon energy, optical fibers, fiber laser, grating of Bragg.

Введение. Традиционными носителями энергии, прошедшими длительную проверку, являются электроны, носители элементарного электрического заряда. Электроэнергетика оказалась эффективной в разнообразных условиях применения. Термин «электрон» введен англичанином Стоуни в 1894 г. С развитием квантовой физики внимание ученых привлек квант электромагнитного излучения, который в 1926 г. американским физиком Льюисом был назван фотоном. Уединенная волновая структура этого излучения – солитон, обладающая свойствами устойчивой частицы, была открыта еще в первой половине XIX века.

Одним из первых предсказал возможность значительного усиления энергии фотонов А.Н. Толстой, который завершил в 1927 г. свой фантастический роман «Гиперболоид инженера Гарина». На его создание писателя вдохновила не только грандиозная башня, построенная по проекту архитектора В.Г. Шухова в Москве и имеющая форму двойного гиперболоида. На основании достижений молекулярной физики он предсказал возможность значительной концентрации световой энергии.

В 1957 г. Гордон Голд, выпускник Колумбийского университета, сформулировал принципы работы лазера. Само английское слово Laser представляет собой аббревиатуру фразы «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», которая дословно переводится как «усиление света за счет вынужденного испускания излучения». Если излучение попадает в сверхвысокочастотный (микроволновый) диапазон, то усилитель такого типа называют мазерным. Соответствующий акроним (англ. maser) получен из предыдущего заменой слова Light на Microwave. Согласно смыслу акронима «лазер» его следует применять только по отношению к генераторам видимого излучения. Однако название «лазер» используется для обозначения устройств, испускающих любое вынужденное излучение. Чтобы уточнить тип излучения, говорят, соответственно, о лазерах инфракрасного, видимого, ультрафиолетового или рентгеновского диапазонов [1, 2].

Теоретические работы Чарльза Таунса совместно с Артуром Шавловым способствовали популяризации идеи лазера в научных кругах и вызвали бурный всплеск экспериментальных исследований, направленных на создание работающего лазера. В 1960 г. Т. Мэйман создал первый в мире рубиновый лазер. В этом же году Ч. Таунс продемонстрировал работу гелий-неонового лазера. В СССР оптические квантовые генераторы света разрабатывали А.М. Прохоров и Н.Г. Басов. Разработка оптических квантовых генераторов – лазеров А.М. Прохоровым, Н.Г. Басовым и Ч. Таунсом была отмечена Нобелевской премией по физике.

Первоначально лазер представлял собой коммуникационный световой источник, не имеющий подходящей среды передачи излучаемой энергии. Понимание, что свет могут проводить тонкие стеклянные волокна за счет полного внутреннего отражения, было идеей, известной с XIX века из работ английского физика Дж. Тиндаля. Однако в 1960-х гг. даже

лучшие стекла обладали большим ослаблением света, пропускаемого через волокно, что значительно ограничивало длину распространения световой энергии. Волокна успешно применялись для передачи изображения на небольшие расстояния, например, в медицине для визуального наблюдения внутренних органов человека. Термин «волоконная оптика» впервые появился в 1956 г. в работе индийского физика Н. Капани, который разработал стеклянные волокна в стеклянной оболочке с различающимися показателями преломления волокна и оболочки.

В настоящей статье показано развитие идеи совмещения генерации энергии, концентрируемой в лазере, со специальной средой ее переноса – оптическими волокнами.

Оптические волокна. В 1966 г. Ч. Као и Дж. Хокхэм, работавшие в английской лаборатории телекоммуникационных стандартов, опубликовали фундаментальную работу, в которой показали, что если в плавленном кварце тщательно устранить примеси, а волокно окружить оболочкой с меньшим показателем преломления, то можно добиться уменьшения ослабления – до 20 дБ/км. Это означает, что при прохождении участка волокна длиной 1 км мощность пучка ослабляется до одной сотой входной мощности. За этот результат китайский ученый Ч. Као позднее, в 2009 г., получил Нобелевскую премию по физике.

В 1977 г. были получены волокна с потерями в 0,20 дБ/км. Это очень маленькая величина, она определяется фундаментальными механизмами оптических потерь в стеклах. Суммарное поглощение складывается из электронного ультрафиолетового поглощения, инфракрасного поглощения, связанного с колебаниями атомов, и, наконец, из рэлеевского рассеяния на неоднородностях меньше длины волны излучения. Все эти потери являются неотъемлемыми свойствами материала. Уровень оптических потерь достиг фундаментального предела – 0,16 дБ/км на длине волны инфракрасного излучения 1,55 мкм, что соответствует ослаблению света в 2 раза на расстоянии 18 км.

Оптические волокна делятся на одно- и многомодовые. Одномодовые волокна поддерживают лишь одно пространственное распределение интенсивности электромагнитной волны – одну моду. В многомодовых волокнах существует межмодовая дисперсия, также приводящая к расплыванию импульса и ограничивающая скорость передачи информации и энергии. Поэтому многомодовые волокна применяются

в основном для передачи мощности или для связи, но на короткие расстояния. Хотя многомодовые световоды и обладают сильной межмодовой дисперсией, производить их и работать с ними намного легче, чем с одномодовыми, так как диаметр сердцевины у них гораздо больше, около 50–100 мкм, по сравнению с одномодовыми (10 мкм).

С разработкой двойных гетероструктур под руководством Ж.И. Алферова в 1970 г. появились полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. С этого момента началось быстрое развитие волоконно-оптических систем передачи информации. Использование уплотнения оптических каналов (мультиплексирования) позволило повысить пропускную способность волоконно-оптических систем до величин диапазона гига- (10^9), тера- (10^{12}) и даже более бит/с [2] (рисунок). На Всероссийской конференции по волоконной оптике в 2013 г. в докладе Е.М. Дианова «На пороге пета-эры» сообщалось о достижении в ближайшее время скорости передачи информации 10^{15} бит/с.

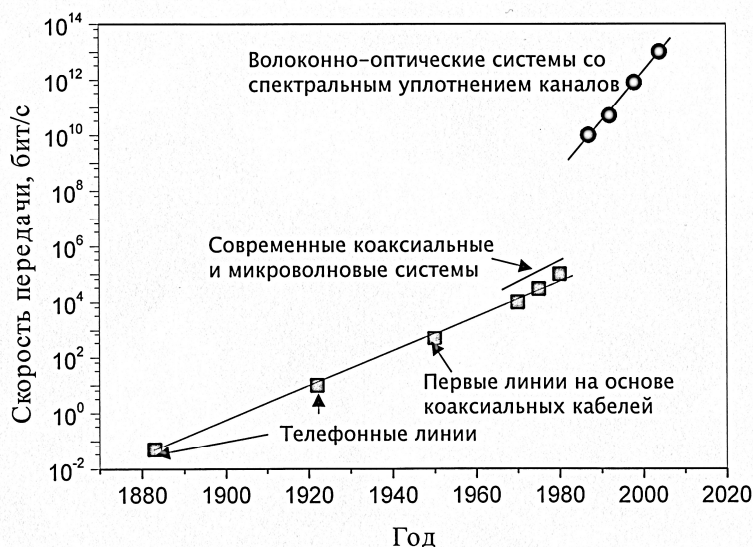


Рис. Увеличение скорости передачи информации

Оптический сигнал ослабляется на 10–20 дБ через каждые 50–100 км волоконно-оптического тракта, что требует его восстановления. До начала 1990-х гг. в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было применение усилителей – сложных устройств, включающих в себя как электронные, так

и оптические компоненты. В 1990 г. Л. Моллинауэром была продемонстрирована возможность передачи сигнала без регенерации на расстояние около 7500 км. Лазер работал в солитонном режиме, использовалось самоусиливающее волокно с добавками эрбия. Солитонные (в очень узком диапазоне спектра) импульсы не рассеиваются и сохраняют свою первоначальную форму по мере распространения по волокну.

Волоконные лазеры. Развитие волоконно-оптических систем связи с высокой скоростью передачи информации потребовало создания эффективных волоконных лазеров и усилителей мощности излучения, совместимых с такими системами.

Впервые волоконный лазер был создан Снитцером в 1961 г., когда была продемонстрирована лазерная генерация в стекле, легированном ионами редкоземельного элемента ниодима [3]. Активный элемент лазера представлял собой стеклянную нить, покрытую оболочкой из стекла с пониженным показателем преломления. Развитие технологии получения волоконных световодов и полупроводниковых источников накачки позволило вернуться к идее волоконного лазера на качественно новом уровне.

Разработаны эффективные волоконные лазеры на основе редкоземельных элементов – неодима, европия, гольмия и тулия, генерирующие в ближней инфракрасной области спектра. Спектральные области лазерной генерации существующих эффективных редкоземельных волоконных лазеров не перекрывают диапазона длин волн инфракрасного излучения 1150–1500 нм, перспективного, в частности, для волоконно-оптических систем связи. Легирование стекла различными редкоземельными примесями дает излучение в различных интервалах длин волн спектральной области. При этом наибольшую ширину спектральной области имеют висмутовые волоконные лазеры на основе алюмосиликатного стекла [4].

Прорыв в лазерной физике ознаменовало появление волоконных лазеров, выходная мощность непрерывного излучения которых за последние 10 лет была увеличена с нескольких сотен ватт до нескольких десятков киловатт (таблица). Беспрецедентно стремительный рост выходной мощности волоконных лазеров сдерживается, по мнению производителей, не возможностями реализации, а наличием платежеспособного спроса [5].

Рост максимальной выходной мощности
непрерывных волоконных лазеров за последние годы

Год XXI века	00	02	04	06	08	10	12
Мощность, кВт	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	75,0

Такой быстрый прогресс в росте выходной мощности объясняется, прежде всего, разработкой улучшенной структуры активных волоконных световодов и успехами в создании систем накачки на основе лазерных диодов.

Волоконные лазеры оказались идеальными не только для использования в оптических системах телекоммуникации, но и позволили создать мощные лазерные системы для промышленного применения. В настоящее время выходная мощность одномодового лазера на основе волокон, активированных эрбием (длина волны из диапазона 1,53...1,6 мкм) и тулием (длина волны из диапазона 1,8...2,1 мкм), доведена до уровня 10 кВт с КПД «от розетки» более 23 % [5]. Суммирование выходного излучения одномодовых лазеров в волоконных объединителях позволяет увеличивать выходную мощность излучения. Расходимость выходного излучения при этом увеличивается, но остается вполне приемлемой для большинства практических применений.

Наиболее мощными коммерческими моделями являются многомодовые волоконные лазеры с выходной мощностью излучения 30 и 50 кВт. Эффективность передачи лазерного излучения мощностью 5 кВт по транспортному волокну оценивается потерями, не превышающими 13 % на расстояние 1 км. Крупнейшая акционерная американская компания IPG Photonics, гендиректором которой является выпускник московского «физтеха» В. Гапонцев, контролирует 80 % мирового рынка волоконных лазеров [6].

В последние годы активные исследования проводятся в области создания мощных волоконных лазеров с использованием волоконных световодов с двойной оболочкой. Значительный прогресс в этом направлении обусловлен, прежде всего, разработкой мощных и надежных полупроводниковых источников накачки, а также качественных световодов с двойной оболочкой. Типичный волоконный световод состоит из трех слоев: одномодовой сердцевины, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и примесями, формирующими профиль показателя преломления, внутренней кварцевой оболочки и внешней полимерной оболочки с показателем преломления меньшим, чем у кварцевого стекла.

Волоконные решетки. Идея усиления света была предложена еще в начале XIX века французским физиком О. Френелем, создавшим приближенный метод расчета дифракционной картины, основанный на разделении волновой поверхности на зоны. Австралийский физик У. Брэгг, используя недавно открытые рентгеновские лучи, предложил в 1912 г. метод анализа кристаллической структуры, который называют рентгеноструктурным. Сегодня брэгговские отражающие решетки легли в основу формирования резонатора непосредственно в волоконных световодах, что позволило реализовать широкий набор лазерных конфигураций в чисто волоконном исполнении.

Волоконная решетка представляет собой участок, как правило, одномодового волокна, в сердцевине которого индуцирована периодическая структура показателя преломления стекла. Запись этой структуры основана на явлении фоторефрактивности легированного кварцевого стекла, т.е. его способности изменять показатель преломления под действием внешнего ультрафиолетового излучения. В общем случае под фотоиндуцированной внутриволоконной брэгговской решеткой показателя преломления следует понимать отрезок волоконного световода с определенной амплитудой модуляции показателя преломления в световедущей области и периодом порядка длины волны распространяющегося излучения (длина волны видимого излучения $\sim 0,5$ мкм).

Существует достаточно много схем и методов изготовления решеток показателя преломления [7]. Как правило, фотоиндуцирование решеток при всех схемах производится с помощью достаточно мощного ультрафиолетового излучения. Из-за малости периода волоконных брэгговских решеток их обычно формируют с использованием интерференционных методов. Процесс записи необходимой решеточной структуры может длиться до нескольких десятков минут, поэтому изготовление качественной решетки возможно лишь при высокой стабильности интерференционной картины. Наиболее распространенными схемами записи волоконных брэгговских решеток являются схемы в интерферометрах с амплитудным и пространственным разделением пучка ультрафиолетового излучения, а также схемы записи фазовой маски – прямая и интерферометрическая.

Независимо от способа записи волоконные брэгговские решетки начинают находить широкое применение в различных устройствах волоконной оптики. Прежде всего, они используются в различных типах усилителей мощности в качестве селективных отражателей, образующих резонатор в волоконных лазерах.

Заключение. Транспортировка энергии в оптическом волокне в виде потока инфракрасного излучения, концентрируемого в волоконном лазере, является ярким достижением квантовой электроники. Для мощности волоконного лазера 75 кВт при диаметре волокна 100 мкм плотность переносимой энергии оценивается значением $\sim 10^9$ Вт/м². Электрическая энергия такой же мощности в соответствии с существующим техническим регламентом может быть передана по медному проводнику диаметром ~ 7 мм, плотность переносимой энергии при этом на два порядка ниже и составляет $\sim 10^7$ Вт/м².

Прогрессирующие темпы развития оптоволоконной техники могут привести к тому, что преобразование и перенос энергии в виде потока инфракрасного излучения (фотонов) могут оказаться в некоторых случаях экономически более выгодными по сравнению с переносом электроэнергии. Такими случаями могут быть переход к освещению объектов экономичными фотодиодами, подведение энергии в скважину и др. Становится актуальной разработка двигателей, различных преобразователей, трансформирующих энергию фотонов.

Библиографический список

1. Цаплин А.И. Фотоника и оптоинформатика. Введение в специальность: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2012. – 399 с.
2. Цаплин А.И., Лихачев М.Е. Методы измерений в волоконной оптике: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 227 с.
3. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 881–900.
4. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. – 2004. – Т. 174. – № 10. – С. 1139–1142.
5. URL: <http://www.mirprom.ru/public/moshchnye-volokonnye-lazery-20-let-razvitiya.html>
6. URL: <http://www.forbes.ru/rating/ekonomika/lyudi/67109-russkaya-hvatka>
7. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085–1103.

References

1. Tsaplin A.I. Fotonika i optoinformatika. Vvedenie v spetsial'nost' [Photonics and optoinformatics. Introduction to specialty]. Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2012. 399 p.
2. Tsaplin A.I., Likhachev M.E. Metody izmerenii v volokonnoi optike [Methods of measurements in fiber optics]. Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011. 227 p.
3. Kurkov A.S., Dianov E.M. Nepreryvnye volokonnye lazery srednei moshchnosti [The continuous fiber lasers of average power]. *Kvantovaya elektronika*, 2004, vol. 34, no. 10, pp. 881-900.
4. Dianov E.M. Volokonnye lazery [Fiber lasers]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2004, vol. 174, no. 10, pp. 1139-1142.
5. Samartsev I.E. Moshchnye volokonnye lazery – 20 let razvitiia [High-power fiber lasers – 20 years of development]. *RITM*, available at: <http://www.mirprom.ru/public/moshchnye-volokonnye-lazery-20-let-razvitiya.html> (accessed: 15.10.14)
6. Kutuzov R. Russkaia khvatka [Russian grasp]. *Forbes.ru*, available at: <http://www.forbes.ru/rating/ekonomika/lyudi/67109-russkaya-hvatka> (accessed: 09.08.14)
7. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Volokonnye reshetki pokazatel'ia prelomleniia i ikh primeneniia [Fiber grids of a refraction index and their application]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.

Сведения об авторе

Цаплин Алексей Иванович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tai@pstu.ru).

About the author

Tsaplin Alexey Ivanovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of General Physics Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: tai@pstu.ru).

Получено 12.12.2014