ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 20. Выпуск 4.

УДК 539.52:669.14.018 DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-4-423-438

История развития лазера и особенности его применения

И. В. Минаев, А. Н. Сергеев, А.Н. Кубанова, Н. М. Добровольский, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий

Минаев Игорь Васильевич — генеральный директор НПП «Телар», лауреат государственной премии РФ в области науки и техники (г. Тула).
e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Сергеев Александр Николаевич — заведующий кафедрой технологии и сервиса, старший научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, профессор, доктор педагогических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: ansergueev@gmail.com

Кубанова Анастасия Николаевна — инженер кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: chupeychik@mai.ru

Добровольский Николай Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой алгебры, математического анализа и геометрии, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: dobrovol@tsput.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Аннотация

В работе описаны исторические аспекты изучения световых и электрических явлений, способствующих возникновению лазера и развития лазерной техники. Представлен принцип действия лазера, перечислены основные типы и характеристики лазеров. Показана зависимость мощности излучения от длины волны лазера. Рассказано о различных областях применения лазеров. Приведен список современной научной литературы с технологическими параметрами лазерной обработки различных материалов.

Ключевые слова: свет, лазер, принцип действия лазера, история развития лазера, области применения лазера, типы и характеристики лазера, лазерная техника, обработка лазером.

Библиография: 36 названий.

Для цитирования:
И. В. Минаев, А. Н. Сергеев, А.Н. Кубанова, Н. М. Добровольский, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий История развития лазера и особенности его применения // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 4, С. 423–438.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK
Vol. 20. No. 4.

UDC 539.52:669.14.018 DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-4-423-438

History of laser development and features of its application

I. V. Minaev, A. N. Sergeev, A. N. Kubanova, N. M. Dobrovolskiy, A. E. Gvozdev, S. N. Kutepov, D. V. Maliy

Minaev Igor Vasilyevich — General Director of Scientific production enterprise «Telur», senior researcher of the center «High-Tech Laser Technologies», laureate of the state prize of the Russian Federation in the field of science and technology (Tula).
e-mail: ivminaev1960@yandex.ru
Sergeev Aleksander Nikolaevich — Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: ansergueev@gmail.com
Kubanova Anastasia Nikolaevna — Head of Research and Development Department of JSC "POLEMA Engineer of the Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: chupeychik@mai.ru
Dobrovolskii Nikolai Mihailovich — Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor, Head of the Department of Algebra, Mathematical Analysis and Geometry, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: dobrovol@tsput.ru
Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru
Kutepov Sergey Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru
Maliy Dmitriy Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Abstract

The paper describes the historical aspects of the study of light and electrical phenomena that contribute to the emergence of the laser and the development of laser technology. The principle of operation of the laser is presented, the main types and characteristics of lasers are listed. The dependence of the radiation power on the laser wavelength is shown. It is told about various fields of application of lasers. The list of modern scientific literature with technological parameters of laser processing of various materials is given.

Keywords: light, laser, laser operating principle, laser development history, laser applications, laser types and characteristics, laser technology, laser treatment.

Bibliography: 36 titles.

For citation:
I. V. Minaev, A. N. Sergeev, A. N. Kubanova, N. M. Dobrovolsky, A. E. Gvozdev, S. N. Kutepov, D. V. Maliy, 2019, "History of laser development and features of its application" , *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 4, pp. 423–438.

1. Основные понятия о лазере, история его возникновения и развития

Лазер как устройство появился в результате слияния двух достижений науки и техники – квантовой физики и радиотехники. Квантовая физика напрямую связана с теорией о свете, природа возникновения которого занимала умы выдающихся мыслителей с древних времен.

Свет – это величайшая ценность, которой одарила нас природа, это необходимое условие существования растений, животных и человека. Световые лучи отражаются и преломляются, они могут усиливать и ослаблять друг друга, огибать препятствия, нагревать предметы, порождать электрический ток, обладать химическим воздействием. Все эти удивительные явления света изучались с древних времен [1]. Знаковые этапы изучения природы света представлены на схеме рисунка 1.

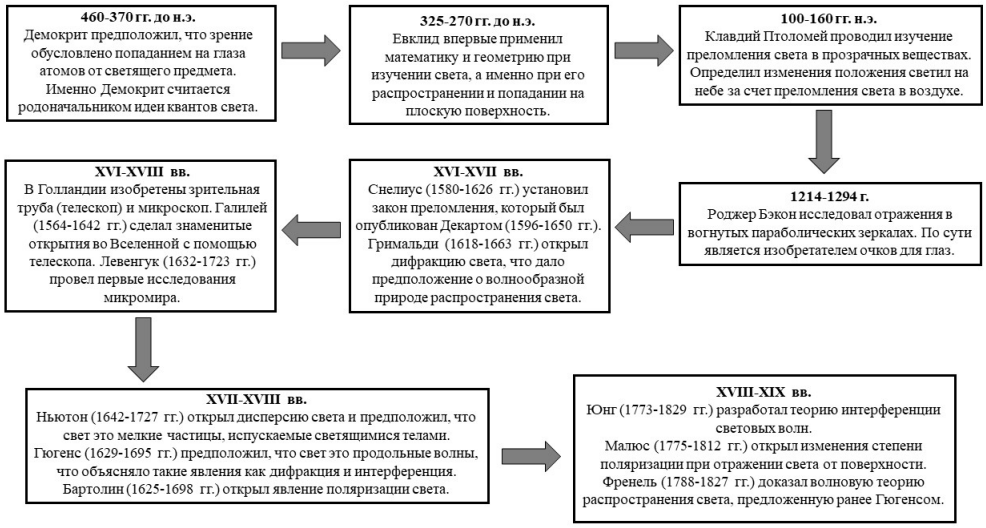

Рис. 1: Исторические этапы исследования природы света.

Изучение радиотехники неразрывно связано с исследованиями электрических явлений, активное развитие которых началось в XIX в. В частности, исследовался разряд лейденской банки (конденсатора, заряженного до высокого напряжения) [2]. Основные этапы развития электрических явлений и продолжение развития теории о свете, способствующие будущему возникновению лазера, приведены на схеме рисунка 2.

Итак, в начале XX века появилась теория света, согласно которой свет проявляет себя как волна или как частица в зависимости от условий наблюдений. Данная теория и послужила в 1954 г. созданию совершенно нового генератора радиоволн - мазера [2].

Конечно же одним из выдающихся научно-технических достижений XX века несомненно является разработка лазера. Его создание в 1960 г. дало начало бурному развитию всей лазерной техники [3]. Лазер (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные электро-магнитные волны за счет вынужденного испускания или вынужденного рассеяния света активной средой, находящейся в оптическом резонаторе. Лазер является

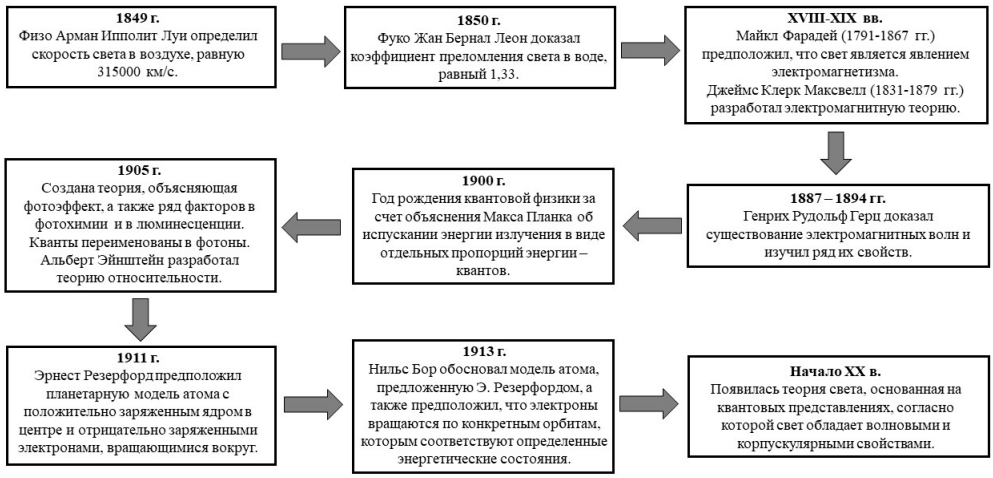

Рис. 2: Исторические этапы изучения электрических явлений и развития теории о свете.

устройством, преобразующим различные виды энергии (электрическую, световую, химическую, тепловую и т.п.) в энергию когерентного электро-магнитного излучения оптического диапазона [4]. Действие лазера основано на вынужденном испускании фотонов под действием внешнего электромагнитного поля [5, 6]. Лазер является источником монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча. Само слово “лазер” составлено из первых букв английского словосочетания Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, означающего «усиление света в результате вынужденного излучения» [3, 7].

В состоянии теплового равновесия большая часть электронов находится на нижних уровнях, но путем какого-либо возбуждения можно осуществить инверсию состояния – увеличить число электронов на верхних уровнях. Из этого состояния под действием излучения с энергией, равной разности энергии верхнего и нижнего уровня, электроны перейдут на нижние уровни, а их энергия преобразуется в излучение с длиной волны и фазой возбуждающего электрона, усиливая его. Таким образом возникнет вынужденное излучение [8, 9]. Иначе говоря, основной физический процесс, определяющий действие лазера, — это вынужденное испускание излучения, происходящее при взаимодействии фотона с возбужденным атомом при точном совпадении энергии фотона с энергией возбуждения атома (или молекулы) [7]. В результате данного взаимодействия возбужденная частица переходит в невозбужденное состояние, а избыток энергии излучается в виде нового фотона с точно такой же энергией, как у первичного фотона.

Процессы перехода частицы в возбужденное состояние и обратно были постулированы А. Эйнштейном в 1916 г. Возможность усиления света в среде с инверсной населенностью за счет вынужденного испускания впервые указал в 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант, предложивший создавать инверсную населенность в электрическом разряде в газе. В 1955 г. группа советских ученых Н. Г. Басова и А. М. Прохорова одновременно и независимо от американского ученого Ч. Таунсона предложили принцип создания первого в мире генератора квантов электромагнитного излучения на среде с инверсной населенностью, в котором вынужденное испускание в результате использования обратной связи приводило к генерации чрезвычайно монохроматического излучения. Позже, в 1964 г., данная группа ученых получила Нобелевскую премию за создание лазера.

В 1960 г. Американский физик Т. Мейман запустил первый квантовый генератор оптиче-

Рис. 3: Исторические этапы возникновения и развития лазера.

ского диапазона – лазер, в котором обратная связь осуществлялась с помощью оптического резонатора, а инверсная населенность возбуждалась в кристаллах рубина (кристалл оксида алюминия с добавкой хрома 0,05%), облучаемых излучением ксеноновой лампы-вспышки. Исторические этапы возникновения и развития лазера представлены на рисунке 3.

Таким образом, многовековое изучение теории света и спектроскопии, развитие радиофизики и квантовой физики, а также радиотехники привело к созданию совершенно нового источника света – лазера. Его разработка означала появление генератора электромагнитных волн светового диапазона с высокой временной и пространственной когерентностью и порогом действия, по причине которых устранялось принципиальное различие между источниками света и генераторами радиоволн

2. Разновидности лазеров

Лазер состоит из трех основных компонентов [5, 10]:

- активная среда (активный элемент), в которой создают инверсию населенностей (появляется люминесценция и сверхлюминесценция). Она может быть твердой, жидкой и газообразной;
- устройство для создания инверсии в активной среде (система накачки);
- устройство для обеспечения положительной обратной связи (оптический резонатор или резонатор Фабри-Перо), состоящий из двух плоских зеркал, расположенных параллельно.

Разновидности лазеров напрямую зависят от характера основных составляющих, в связи с чем выделяют следующие:

- по способу создания в среде инверсной населенности (по способу накачки):
- оптическая накачка;
- возбуждение электронным ударом;
- химическая накачка;
- в зависимости от рабочей среды:
- газы (аргон, гелий-неоновая смесь, углекислый газ);
- жидкости (растворы люминесцирующих веществ, например, родамин 6Ж);
- твердотельные (рубин, иттриево-алюминиевый гранат);

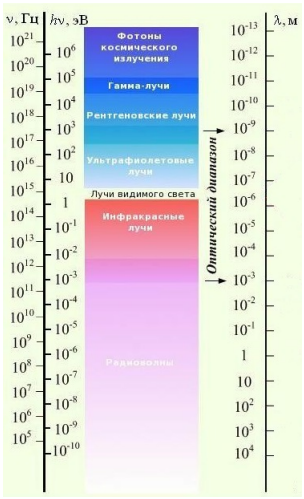

Рис. 4: Средняя длина и мощность наиболее распространенных лазеров [5].

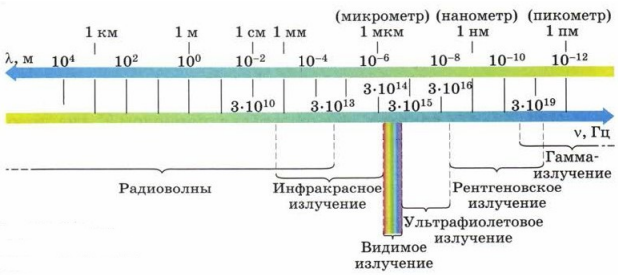

Рис. 5: Шкала электромагнитных волн [11].

- стекла (неодимовое стекло);
- кристаллы (рубин с примесями хрома, кобальта, никеля, урана и др. редкоземельных элементов);
- полуводники (полупроводниковые и полосковые лазеры);
- по режиму работы:
- импульсный;
- непрерывный;
- по длине волны излучения:
- рентгеновские;
- ультрафиолетовые;
- видимого диапазона;
- ближнего инфракрасного излучения;
- дальнего инфракрасного излучения;
- конструкцией резонатора.

Существующие лазеры охватывают широкий диапазон длин волн – от ультрафиолетового до субмиллиметрового (инфракрасного). Зависимость мощности излучения лазера от длины его волны представлена на рис. 4.

Помимо ультрафиолетового и инфракрасного излучений за счет различных эффектов (генерация гармоник, параметрическое преобразование волн, вынужденные рассеяния) удалось значительно расширить диапазон волн лазерного излучения. На рисунке 5 представлена шкала электромагнитных волн (излучений) при изменении длины волны.

Расширенный перечень типов лазеров с описанием их основных характеристик приведен

в таблице 1.

Таблица 1

Типа лазеров и их характеристики [5, 12]. Благодаря своим уникальным типам, характери-

	Активная среда	Способ возбуждения	Длина волны, мкм	Режим	Длительность импульсов	Частота повторения, Гц	Мощность	Расходимость излучения
Газовые лазеры	He + Ne	Газовый разряд	0,63; 1,15;	непрерывный	-	-	1 - 50 мВт	0,5 – 3 мрад
	CO_2	Газовый разряд в отпаянной трубке	3,39; 10,6	непрерывный	-	-	5 - 100 мВт	2 - 10 мрад
		Газовый разряд с прокачкой смеси	10,6	непрерывный импульсный	- 1 – 50 мкс	- 25	$100 – 10^4$ Вт 10^4 Вт	2 - 10 мрад 2 - 10 мрад
		Электроионизационный	10,6	импульсный	20 мкс	-	10^5 Вт	2 - 10 мрад
		Газодинамический	10,6	непрерывный	-	-	100 кВт	2 - 10 мрад
		Химический	10,6	непрерывный импульсный	- 1 мкс	- -	10 кВт 10^4 Вт	1 мрад 1 мрад
	HF	Химический	2,6 – 3,5	непрерывный импульсный	- 20 нс	- -	10 кВт $2 \cdot 10^{11}$Вт	- -
	CF_3I	фотодиссоциация	1,315	импульсный	1 мкс – 1 мс	-	10^5 - 10^7 Вт	1 мрад
Жидкостные лазеры	Неорганич. Жидкости (>50)	Ламповая накачка, лазерная накачка	0,22 – 0,86	импульсный	0,1 – 10 мкс	0,1 – 500	10^4 - 10^5Вт	2 - 4 мрад
	Огранич. красители	Лазерная накачка	0,55 – 0,67	непрерывный	-	-	0,1 – 1 Вт	0,2 мрад
Полупроводниковые лазеры	AlGaAs	Инжекция носителей через p-n-переходы	0,1 – 0,9	импульсный непрерывный	100 – 200 нс -	500 – 5000 -	10 – 50 Вт 0,1 – 1 Вт	4 – 6 град 4 – 6 град
	CdS	Электронным пучком	0,49 – 0,69	импульсный	3 нс	-	200 кВт	4 – 6 град
Твердотельные лазеры	Рубин	Ламповая накачка	0,694	Импульсный свободной генерации Импульсный с модулированной добротностью	1 – 0,5 мс 20 нс	10^{-3} – 1 1 – 2	10^5 - 10^6Вт 10^6 - 10^9Вт	10 – 40 мрад 1 – 3 мрад
	Стекло с примесью Nd	Ламповая накачка	1,058	Импульсный свободной генерации Импульсный с модулированной добротностью Режим синхронизации мод	1 – 3 мс 3 – 30 нс $5 \cdot 10^{-3}$ - 1 нс	10^{-3} – 1 10^{-3} – 0,1 -	10^5 - 10^6Вт 10^5 - $5 \cdot 10^{10}$Вт 10^{11} - 10^{13}Вт	3 – 15 мрад 0,5 – 1 мрад -

Рис. 6: Типа лазеров и их характеристики [5, 12].

стикам и свойствам лазеры нашли многочисленные применения в науке, технике и медицине.

3. Особенности и области применения лазеров

В качестве достоинств лазерного излучения отмечают следующие [2, 8]:

- высокая монохроматичность,
- высокий уровень выходной мощности,
- высокая когерентность,
- малая расходимость,
- высокая интенсивность лазерного излучения,
- короткая длительность импульса излучения,
- уникальные спектральные характеристики.

Эти достоинства позволяют использовать лазер в качестве тончайшего инструмента для исследования особенностей строения атомов и молекул и для выяснения биологической структуры живых клеток [1].

Лазерная технология обработки материалов и изделий основана, в основном, на применении твердотельных и газовых лазеров, работающих в импульсном, импульсно-периодическом и непрерывном режимах. Основные операции лазерной обработки связаны с тепловым действием лазерного излучения, основными преимуществами которого являются [4]:

- высокая локальность нагрева,
- кратковременность воздействия,
- малая зона термического влияния,
- возможность ведения технологических процессов в любых прозрачных средах и внутри герметически закрытых объемов.

Применение лазеров многообразно и может быть использовано в двух различных направлениях:

1. Нерезонансное взаимодействие мощных световых потоков с веществом в непрерывном и импульсном режимах (лазерная технология, лазерный синтез и др.);

2. Селективное воздействие на атомы, ионы, молекулы, вызывающие процессы фотодиссоциации, фотоионизации, фотохимической реакции (3D-печать в аддитивном производстве [13, 14]).

Лазеры нашли широкое применение в различных технологических областях промышленности для обработки таких материалов как: металл, бетон, стекло, ткань, кожа, полимеры. Такие технологические процессы как сварка, резка и плавление металлов при 3D-печати осуществляются главным образом газовыми лазерами, обладающими высокой средней мощностью. В частности, для резки применяются мощные лазеры на основе углекислого газа. В последнее время волоконные (твердотельне) лазеры применяют как для решения технологических задач по резке материалов, так и для сверления и сварки изделий в автомобильной и авиационной отраслях. Данный тип лазеров не требует водяного охлаждения, а их средняя мощность достигает 1 кВт [2, 5, 15].

В металлургии лазеры позволяют получить сверхчистые металлы, выплавляемые в вакууме или в контролируемой газовой среде. При помощи изменения режимов в процессе лазерной обработки возможно проводить локальные и зональные термообработки, тем самым изменяя характеристики как поверхности, так и структуры изделия [16-21, 22-28]. Сверхстабильные лазеры являются основой оптических стандартов частоты (лазерных сейсмографов и др. точных физических приборов). Лазерный отжиг применяют для кристаллизации как аморфных, так и поликристаллических пленок кремния, осажденного на аморфные подложки [8].

Луч лазера создает на поверхности материала температуру в несколько тысяч градусов, что может привести к мгновенному испарению данного материала в месте падения луча. Это открывает возможность обработки, например, шлифовку поверхностей таких сверхтвердых материалов как алмаз, корунд, специальные жаропрочные сплавы, так и осуществлять сварку тугоплавких материалов, таких как вольфрам и молибден. Современные лазерные установки способны проводить сложнопрофильную резку поверхностей путем программирования на системах числового программного управления [29, 30].

В сфере лазерной спектрометрии и нелинейной спектрометрии применяются лазеры на красителях (лазеры с перестраиваемой частотой) за счет возможности повышения разрешающей способности и чувствительности метода вплоть до наблюдения спектров отдельных атомов.

Лазеры нашли широкое распространение в медицине в качестве бескровного скальпеля в офтальмологии, при лечении кожных заболеваний. При помощи лазерных технологий удалось разработать методику, позволяющую определять ядра клеток и различать здоровые клетки от злокачественных, т.е. проводить биопсию в процессе операции. В области ангиологии фемтосекундные лазеры применяют для изготовления имплантируемых пластмассовых трубок, искусственно замещающих кровеносные сосуды в теле человека. В отрасли генной инженерии с применением лазерных технологий проводятся исследования в области микрохирургии биологической клетки [2].

С появлением лазеров начались исследования по повышению стабильности их частоты. На основе лазеров были созданы источники электромагнитных волн оптического диапазона с высокой стабильностью частоты. Это способствовало применению лазеров в военной отрасли для навигации, точного определения расстояния до объекта и скорости объекта. Уже сейчас лазерные технологии решают задачи по запуску космических и/или крылатых ракет и управление их полетом. Данное применение лазера (как правило, используются фемтосекундные лазеры) так же используется для создания компактных и сверхточных оптических часов. В военной сфере так же широко распространены химические лазеры, особенностью которых является автономность от источников электроэнергии для создания активной среды. Данный

тип лазеров работает в непрерывном режиме и способен выдавать мощность 2,2 МВт, за счет чего используется при создании лазерного оружия.

В космической сфере применение лазеров позволяет определить размеры звезд и их угловой размер с точностью до 0,007″, что превосходит возможности лучших оптических телескопов.

В области экологии лазерные локаторы применяются для контроля распределения загрязнений в атмосфере на различных высотах, определяют скорости воздушных течений, состав и температуру атмосферы.

Лазерные технологии применяют для изготовления тонких пленок из газообразного сырья путем химического осаждения с применением световой энергии.

Во многих лабораториях мира проводятся работы по лазерному термоядерному синтезу, для проведения которого необходима лазерная энергия мощностью более 10 кДж и с импульсом в несколько наносекунд. Научные лаборатории, занимающиеся физикой низких температур, стремятся приблизиться к абсолютному нулю при экспериментах. Благодаря использованию лазерных ловушек для охлаждения атомов в 1955 г. удалось снизить температуру до 2-3 мкК. Научно установлено, что энергия лазерного излучения всего в 1-10 Дж, сосредоточенная в фемтосекундном импульсе, дает пиковую мощность близкую в петаватту (1 ПВт = 10^{15} Вт). При фокусировании данного лазерного пучка возможно получить интенсивность до 10^{21} Вт/см^2 [2].

В повседневной жизни каждый человек так же встречается с лазерами. Особенно широко распространены полупроводниковые (диодные) лазеры, которые используются в принтерах, музыкальных проигрывателях, компьютерах, фонарях, детских игрушках. Данные лазеры перекрывают широкий диапазон волн – от 630 до 1600 нм -, и имеют весьма компактные размеры (300*300*100 мкм) при достаточно высоком КПД (50%) [2].

Применение и развитие лазеров позволило ответить на множество вопросов в области астрономии [5, 15]:

- уточнение астрономической постоянной и систем космической навигации,
- расширение знаний об атмосферах и строении поверхности планет,
- измерение скоростей вращения планет.

Основные разновидности сфер применения в зависимости от типа лазера представлены в таблице 2.

Таблица 2

Лазерные технологические процессы [4, 31, 32].

Вид обработки	Особенности лазера	Сфера применения
Сверление отверстий сложного профиля с точностью обработки 1 мкм.	Импульсные лазеры на неодимовом стекле, иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ) или CO2. Параметры лазера: — энергия от десятых долей до десятков Дж; — длительность импульса 0,1-1 мс; — плотность потока энергии до 10 МВт/см^2.	— Обработка твердых, хрупких, тугоплавких материалов; — изготовление стальных и алмазных фильер.

Резка с шириной реза 5-30 мкм и скрабирование.	Газовые лазеры (CO2-лазер) на молекулярном азоте либо твердотельные лазеры на ИАГ с ниодимом. Параметры лазера: — средняя мощность 10-50 Вт; — частота следования импульсов 1 кГц.	— Изготовление интегральных схем; — Резка листовых материалов.
Сварка с толщиной сварного шва 0,01-1 мм.	Импульсные лазеры с интенсивностью 0,1-1 МВт/см2.	Сварка лазером позволяет соединять металлы и сплавы, не свариваемые обычным способом (W с Cr или со сталью).

Благодаря возникновению и развитию лазеров в мире появились такие новые научные направления как нелинейная оптика и волоконная оптика. Развитие лазерной науки интенсивно продолжается. Так, успешно осваиваются новые диапазоны длин волн от миллиметровых волн до мягкого рентгена. Пиковые мощности современных лазеров достигают петаватта (1 ПВт = 10^{15} Вт), а работа лазеров в импульсном режиме позволяет получить длительность порядка фемтосекунды (1 фс = 10^{-15} с) [14].

Рассмотрение даже столь небольшого числа применений лазера демонстрирует его уникальные свойства. Наряду с транзистором и быстродействующим компьютером лазер занимает важное место в развитии информатики с возможностью передавать информацию со сверхвысокой скоростью передачи, соответствующей частоте 10^{14}- 10^{15} Гц.

Различные области практического применения и развития лазеров приведены в таблице 3 и в работах [14-36].

Таблица 3

Технология применения лазеров различных характеристик

Особенности лазера	Лазеры невысокой и средней мощности (газовые лазеры импульсно-периодического действия, лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната с примесью неодима).	Лазеры большой средней мощности более 1 кВт.
Виды обработки	Сверление тонких отверстий диаметром 1-10 мкм и глубиной до 10-100 мкм.	Резка и сварка толстых металлических (как правило стальных) листов; Резка мрамора, гранита, раскрой тканей, кожи; Поверхностная закалка, наплавление и легирование крупногабаритных деталей; Очистка зданий от поверхностных загрязнений.

Сферы применения	Часовая промышленность; изготовление фильер для прокатки; Резка и сварка в области микроэлектроники и электровакуумной промышленности; Маркировка миниатюрных изделий, полиграфическое дело; Медицина.	Применение как источника энергии для получения электрического тока, механической энергии, энергии химических процессов; Машиностроение; Автомобилестроение; Промышленность строительных материалов; Аддитивные технологии.

За годы развития лазерной аппаратуры (с 1960 г.) достигнут большой прогресс как в области увеличения мощности излучения лазера, так и в сокращении длительности излучения, близкому к периоду световой волны, составляющему 1-2 фемтосекунды.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билимович Б. Ф. Световые явления вокруг нас: Кн. Для внеклас. Чтения учащихся 8-10 кл. – М.: Просвещение, 1986. 176 с
2. Крюков П. Г. Лазер – новый источник света. М.: Бюро Квантум, 2009. – 176 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 110. Приложение к журналу «Квант» №2/2009.)
3. Тарасов Л.В. Оптика, рожденная лазером. Книга для внеклассного чтения. 8-10 кл. М., «просвещение», 1977.
4. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. Кол. Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия. Т. II. Добротность – Магнитооптика. 1990. 703 с
5. Физика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: большая Российская энциклопедия, 1999. 944 с.
6. Шавлов А., Фогель С., Далберджер Л., Оптические квантовые генераторы (лазеры), пер. с англ., М., 1962.
7. Энциклопедический словарь юного физика / Сост. В.А. Чуянов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Педагогика, 1991. 336 с.
8. Гонда С., Сэко Д., оптоэлектроника в вопросах и ответах: Пер. с японского. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1989. 184 с.
9. Лазер. Усов С.В., Минаев И.В., Зверев Ю.Б., Зарубин М.Ю., Грашкин И.Л. патент на изобретение RUS 2229761 08.04.2002.
10. Звелто О., Физика лазеров, пер. с англ., М., 1979.
11. Платформа Материалов Pandia.ru. Режим доступа: https://pandia.ru/text/82/090/23571.php
12. Справочник по лазерам, под ред. А.М. Прохорова, пер. с англ., т. 1-2, М., 1978.
13. Масайло Д. В. Разработка ресурсосберегающей технологии производства сферических порошковых материалов из техногенных отходов машиностроения (стружки) и их использование в аддитивных технологиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург 2019 г.

14. The impact of the strategy of laser treatment on structure formation of steel in a state of pre-transformation. Gvozdev A.E., Minayev I. V., Tikhonova I.V., Sergeev A.N., Chukanov A.N., Khonelidze D.M., Maliy D.V. В сборнике: Междисциплинарне проблемы аддитивных технологий. Сборник тезисов III Всероссийского научного семинара с международнвм участием. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2017. С. 27-28.

15. О'Шиа Д., Коллен Р., Родс У., Лазерная техника, пер. с англ., М., 1980.

16. Особенности лазерной резки медных и алюминиевых сплавов. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Гусев А.Д., Стаханова Я.А., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Малий Д.В., монография / Тула, 2019.

17. Методология выбора режимов лазерной резки листов из конструкционных сталей для обеспечения требуемого комплекса показателей качества поверхности. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Малий Д.В. Материаловедение. 2019. №10. С. 25-32.

18. Основы лазерной и газопламенной обработки конструкционных сталей. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е. Монография / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФГБОУ ВО «тульский государственный педагогический университет имени Л.Н. толстого», ФГБОУ ВО «тульский государственный университет», Академия проблем качества Российской Федерации. Тула, 2018.

19. Decarburization and the influence of laser cutting on steel structure (Влияние содержания углерода и параметров лазерной резки на строение и протяженность зоны термического влияния стальных листов). Sergeev N.N., Minaev I.V., Gvozdev A.E., Tsyganov I. A., Tikhonova I.V., Alyavdina E.S., Gubanov O.M., Breki A.D. Steel in Translation. 2018. Т. 48. № 5. С. 313-319.

20. Влияние химического состава листового проката и параметров лазерной обработки на показатели качества. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Бреки А.Д., Калинин А.А., Малий Д.В. В сборнике: VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Сборник материалов. 2017. С. 208-209.

21. Зависимость показателей качества поверхности от режимов лазерной и газопламенной обработки листового проката из углеродистых сталей. Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Минаев И.В., Алявдина Е.С., Сергеев А.Н., Бреки А.Д., Кутепов С.Н., Калинин А.А., Малий Д.В. В сборнике: VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Сборник материалов. 2017. С. 210.

22. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Tikhonova I.V., Sergeyev A.N., Khonelidze D.M., Maliy D.V., Golyshev I.V., Kolmakov A.G., Provotorov D.A. Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

23. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки. Гвоздев А.Е, Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Колмаков А.Г., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Хонелидзе Д.М., Малий Д.В., Голышев И.В. Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

24. Характеристики поверхности и структуры зоны термического влияния листа стали марки 20 после лазерной резки. Тихонова И.В., Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Алявдина А.Е., Гвоздев А.Е, Калинин А.А. В сборнике: ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ. Сборник материалов. 2015. С. 240-241.

25. Характеристики поверхности и структуры зоны термического влияния листов стали марки 65Г после лазерной резки. Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Минаев И.В., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е, Калинин А.А, Авдонин А.А., Новикова В.В. В сборнике: ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ. Сборник материалов. 2015. С. 241-242.

26. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов. Гвоздев А.Е., Голышев И.В., Минаев И.В., Сергеев А.Н., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Хонелизде Д.М., Колмаков А.Г. Материаловедение. 2015. № 2. С. 31-36.

27. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets. Gvozdev A.E., Golyshev I.V., Minayev I.V., Sergeyev A.N., Sergeyev N.N., Tikhonova I.V., Khonelidze D.M., Kolmakov A.G. Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 4. С. 305-310.

28. Влияние параметров лазерной резки на качество поверхности реза стальных листов. Минаев И.В., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е, Хонелидзе Д.М., Голышев И.В. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 50-58.

29. High-power impulse yag laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials. Usov S.V., Minaev I.V. Journal of Materials processing Technology. 2004. Т. 149. № 1-3. С. 541-545.

30. Автоматизированные лазерные технологические комплексы для изготовления сложнопрофильных изделий из тонколистового материала. Усов С.В., Минаев И.В., Ануфриев А.И., Кокоулин М.М., Зверев Ю.Б., Зарубин М.Ю., Кузнецов К.Л., Выставкина В.В., Тереховкина Т.Н., Фомичев А.Г., Курочкин И.Е. Вестник машиностроения. 1992. № 5. С. 45.

31. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н., лазерная обработка материалов, М., 1975.

32. Промышленное применение лазеров, под ред. Г. Кебнера, пер. с англ., М., 1988.

33. Рахмонов З.Х. Распределение значений характеров Дирихле в последовательности сдвинутых простых чисел // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. 2013. Т. 13. В. 4(2). с. 113-117.

34. Рахмонов З.Х. Суммы значений неглавных характеров по последовательности сдвинутых простых чисел // Тр. МИАН. 2017. Т. 299. С. 1-27.

35. Рахмонов З.Х. Об оценке суммы значений неглавных характеров в последовательности сдвинутых простых чисел // Доклады АН Республики Таджикистан. 2017. Т. 60. № 9. С. 378-382.

36. Рахмонов З.Х. О распределении значений характеров Дирихле в последовательности сдвинутых простых чисел // Доклады АН Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 1. С. 5-9.

REFERENCES

1. Bilimovich, B. F., 1986, "Light phenomena around us: Book. For extracurricular activities" [Svetovye yavleniya vokrug nas], Moscow, Education, 176 p.

2. Kryukov, P. G., 2009, "Laser-a new light source" [Lazer – novyj istochnik sveta], Moscow: Bureau Quantum, 176 p.

3. Tarasov, L. V., 1977, "Optics born by laser" [Optika, rozhdennaya lazerom], Moscow, Education, 143 p.

4. Prokhorov, A. M., Alekseev, D. M., Baldin, A. M., Bonch-Bruevich, A. M., Borovik-Romanov, A. S., et al., 1990, "Physical encyclopedia" [Fizicheskaya enciklopediya], Moscow, 703 p.

5. Prokhorov, A. M.,1999, "Physics. Great encyclopedic dictionary" [Fizika. Bol'shoj enciklopedicheskij slovar'], Moscow, Big Russian Encyclopedia, 944 p.

6. Shavlov, A., Vogel, S., Dalberger, L., 1962, "Optical quantum generators (lasers)" [Opticheskie kvantovye generatory (lazery)], Moscow, 1962.

7. Chuyanov, V. A., 1991, "Encyclopedic dictionary of young physicist" [Enciklopedicheskij slovar' yunogo fizika], Moscow, Pedagogy, 1991, 336 p.

8. Gonda, S., Seko, D., 1989 "Optoelectronics in questions and answers" [Optoelektronika v voprosah i otvetah], Leningrad, Leningradskoe otdelenie, 184 p.

9. Usov, S. V., Minaev, V. I., Zverev, B. Yu., Zarubin, M. Y., Gruskin, l.L., 2002, "Laser", Patent for invention RUS 2229761 08.04.2002.

10. Zvelto, O., 1979, "Physics of lasers" [Fizika lazerov], Moscow, Mir, 540 p.

11. Materials Platform Pandia.ru. URL: https://pandia.ru/text/82/090/23571.php

12. Prokhorov, A. M., 1978, "Handbook of lasers" [Spravochnik po lazeram], vol. 1, Moscow, Mir, 472 p.

13. Samoilo, D. V., 2019, "Development of resource-saving technology of production of spherical powder materials from technogenic waste of mechanical engineering (chips) and their use in additive technologies" [Razrabotka resursosberegayushchej tekhnologii proizvodstva sfericheskih poroshkovyh materialov iz tekhnogennyh othodov mashinostroeniya (struzhki) i ih ispol'zovanie v additivnyh tekhnologiyah.], St. Petersburg, 20 p.

14. Gvozdev, A.E., Minaev, I. V., Tikhonova, I.V., Sergeev, A.N., Chukanov, A.N., Khonelidze, D.M., Maliy, D.V., 2017, "The impact of the strategy of laser treatment on structure formation of steel in a state of pre-transformation" [Vliyanie strategii lazernoj obrabotki na strukturoobrazovanie stali v sostoyanii predvaritel'noj transformacii], Proceedings of III scientific seminar with international participation, Tomsk, Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politekhnicheskij universitet, pp. 27-28.

15. O'Shea, D., Collen, R., Rhodes, W., 1980, "Laser technology", Moscow, 256 p.

16. Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Tikhonova, I. V., Gusev, A.D., Stakhanova, Ya. A., Kutepov, S. N., Gvozdev, A.E., Maliy, D. V., 2019, "Features of laser cutting of copper and aluminum alloys" [Osobennosti lazernoj rezki mednyh i alyuminievyh splavov], Tula, 123 p.

17. Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Tikhonova, I. V., Gvozdev, A. E., Kolmakov, A. G., Sergeev, A. N., Kutepov, S.N., Maliy, D. V., 2019, “Methodology for mode selection in laser cutting of sheets of structural steel to provide the required set of indicators of the quality of the surface” [Metodologiya vybora rezhimov lazernoj rezki listov iz konstrukcionnyh stalej dlya obespecheniya trebuemogo kompleksa pokazatelej kachestva poverhnosti.], Materialovedenie, No. 10, pp. 25-32.

18. Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Tikhonova, I. V., Sergeev, A. N., Kutepov, S. N., Komarova, M. Yu., Gvozdev, A. E., 2018, “Fundamentals of laser and flame treatment of structural steels” [Osnovy lazernoj i gazoplamennoj obrabotki konstrukcionnyh stalej], Tula, 283 p.

19. Sergeev, N.N., Minaev, I.V., Gvozdev, A.E., Tsyganov, I. A., Tikhonova, I.V., Alyavdina, E.S., Gubanov, O.M., Breki, A.D., 2018, “Decarburization and the influence of laser cutting on steel structure” [Vliyanie soderzhaniya ugleroda i parametrov lazernoj rezki na stroenie i protyazhennost’ zony termicheskogo vliyaniya stal’nyh listov], Steel in Translation, vol. 48, No. 5, pp. 313-319 p.

20. Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Tikhonova, I. V., Komarova, M. Yu., Gvozdev, A. E., Sergeev, A. N., Kutepov, S. N., Breki, A.D., Kalinin, A. A., Maliy, D. V., 2017, “Influence of chemical composition of sheet metal and laser treatment parameters on quality indicators” [Vliyanie himicheskogo sostava listovogo prokata i parametrov lazernoj obrabotki na pokazateli kachestva], Proceedings of VII international conference "Deformation and destruction of materials and nanomaterials Moscow, pp. 208-209.

21. Sergeev, N. N., Tikhonova, I. V., Gvozdev, A. E., Minaev, I. V., Alyavdina, E. S., Sergeev, A. N., Breki, A.D., Kutepov, S. N., Kalinin, A. A., Maliy, D. V., 2017, “The dependence of the quality parameters of the surface from laser and gas-flame processing of sheet metal of carbon steel” [Zavisimost’ pokazatelej kachestva poverhnosti ot rezhimov lazernoj i gazoplamennoj obrabotki listovogo prokata iz uglerodistyh stalej], Proceedings of VII international conference "Deformation and destruction of materials and nanomaterials". Moscow, p. 210.

22. Gvozdev, A.E., Sergeyev, N.N., Minayev, I.V., Tikhonova, I.V., Sergeyev, A.N., Khonelidze, D.M., Maliy, D.V., Golyshev, I.V., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A., 2017, “Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting”, Inorganic Materials: Applied Research, vol. 8, No. 1, pp. 148-152.

23. Gvozdev, A. E, Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Kolmakov, A. G., Tikhonova, I. V., Sergeev, A. N., Provotorov, D. A., Honelidze, D. M., Maliy, D. V., Golyshev, I. V., 2016, “Temperature distribution and structure in the heat affected zone for steel sheets after laser cutting” [Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stal’nyh listov posle lazernoj rezki], Materialovedenie, No. 9, pp. 3-7.

24. Tikhonova, I. V., Sergeev, N. N., Minaev, I. V., Alyavdina, A. E., Gvozdev, A. E., Kalinin, A. A., 2015, “Characteristics of the surface and structure of the heat affected zone of steel sheet mark 20 after laser cutting” [Harakteristiki poverhnosti i struktury zony termicheskogo vliyaniya lista stali marki 20 posle lazernoj rezki], Proceedings of Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials, Moscow, pp. 240-241.

25. Sergeev, N. N., Tikhonova, I. V., Minaev, I. V., Komarova, M. Yu., Gvozdev, A. E., Kalinin, A. A., Avdonin, A. A., Novikova, V. V.,2015, “Characteristics of the surface and structure of the heat-affected zone of 65G steel sheets after laser cutting” [Harakteristiki poverhnosti i struktury zony termicheskogo vliyaniya listov stali marki 65G posle lazernoj rezki], Proceedings of Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials, Moscow, pp. 241-242.

26. Gvozdev, A. E., Golyshev, I. V., Minaev, I. V., Sergeev, A. N., Sergeev, N. N., Tikhonova, I. V., Honelizde, D. M., Kolmakov, A. G., 2015, "Multiparametric optimization of parameters of laser cutting of steel sheets" [Mnogoparametricheskaya optimizaciya parametrov lazernoj rezki stal'nyh listov], Materialovedenie, No. 2, pp. 31-36.

27. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V., Minayev, I.V., Sergeyev, A.N., Sergeyev, N.N., Tikhonova, I.V., Khonelidze, D.M., Kolmakov, A.G., 2015, "Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets", Inorganic Materials: Applied Research, vol. 6, No. 4, pp. 305-310.

28. Minaev, I. V., Sergeev, N. N., Tikhonova, I. V., Gvozdev, A. E., Honelidze, D. M., Golyshev, I. V., 2014, "Influence of laser cutting parameters on the cutting surface quality of steel sheets" [Vliyanie parametrov lazernoj rezki na kachestvo poverhnosti reza stal'nyh listov], Proceedings of the Tula State University. Technical science, No. 3, pp. 50-58.

29. Usov, S.V., Minaev, I.V., 2004, "High-power impulse yag laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials", Journal of Materials processing Technology, vol. 149, No. 1-3, pp. 541-545.

30. Usov, S. V., Minaev, I. V., Anufriev, A. I., Kokoulin, M. M., Zverev, Yu. B., Zarubin, M. Yu., Kuznetsov, K. L., Vystavkina, V. V., Terekhovkina, T. N., Fomichev, A. G., Kurochkin, I. E., 1992, "Automated laser technological complexes for the manufacture of complex products from thin-sheet material", Bulletin of mechanical engineering, No. 5. p. 45.

31. Rykalin, N. N., Uglov, A. A., Kokora, A. N., 1975, "Laser processing of materials", Moscow, 296 p.

32. Kebner, G., 1988, "Industrial application of lasers", Moscow, 280 p.

33. Rakhmonov, Z. H., 2013, "The Distribution of values of Dirichlet characters in the sequence of shifted primes" [Raspredelenie znachenij harakterov Dirihle v posledovatel'nosti sdvinutyh prostyh chisel], Izvestiya of Saratov University. New series. Mathematics Series. Mechanics. Informatics, vol. 13. No. 4(2), pp. 113-117.

34. Rakhmonov, Z. H., 2017, "Sums of values of non-capital characters in the sequence of shifted primes" [Summy znachenij neglavnyh harakterov po posledovatel'nosti sdvinutyh prostyh chisel], MIAN, vol. 299, pp. 1-27.

35. Rakhmonov, Z. H., 2017, "On the estimation of the sum of values of non-capital characters in the sequence of shifted primes" [Ob ocenke summy znachenij neglavnyh harakterov v posledovatel'nosti sdvinutyh prostyh chisel], Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, vol. 60, No. 9, pp. 378-382.

36. Rakhmonov, Z. H., 2013, "On the distribution of values of Dirichlet characters in the sequence of shifted primes" [O raspredelenii znachenij harakterov Dirihle v posledovatel'nosti sdvinutyh prostyh chisel], Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, vol. 56, No. 1, pp. 5-9.

Получено 17.10.2019 г.
Принято в печать 20.12.2019 г.