

УДК 621.373.826

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ  
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ФТОРОВОДОРОДНОГО ХИМИЧЕСКОГО  
ЛАЗЕРА****Белый Вячеслав Сергеевич,**

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева», г. Москва, el.belaya2015@yandex.ru

**Яковлева Дарья Валерьевна,**

студентка ФГБОУ ВО «Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева», г. Москва, dasha4011971@gmail.com

**Аннотация**

В данной научной статье рассматриваются особенности конструкции и принцип работы типового химического лазера (ХЛ), а также способы улучшения технических характеристик последнего. Проводится анализ принципа работы ХЛ, активной средой которого является фтористый водород HF. Показана возможность использования фотонно-разветвлённых цепных реакций (ФРЦР), в процессе которых часть энергии излучаемых фотонов расходуется на диссоциацию молекулы фтора на свободные атомы. Техническая реализация разветвлённых цепных реакций в ХЛ позволяет снизить энергетические затраты на инициализацию лазерного излучения в инфракрасном диапазоне волн.

**Ключевые слова:** химический лазер, химическая реакция, фотонно-разветвлённая цепная реакция, фтороводород, лазерная среда, индуцирующий фотон.

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF REDUCING THE ENERGY  
CONSUMPTION OF A HYDROGEN FLUORIDE CHEMICAL LASER****Vyacheslav S. Belyi,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

**Daria V. Yakovleva,**

student of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

**ABSTRACT**

This scientific article discusses the design features and operating principle of a typical chemical laser, as well as ways to improve the technical characteristics of the latter. The analysis

of the principle of operation of chemical laser, the active medium of which is hydrogen fluoride HF. The possibility of using photon-branched chain reactions is shown, during which part of the energy of the emitted photons is spent on dissociation of the fluorine molecule into free atoms. The technical implementation of branched chain reactions in chemical laser makes it possible to reduce the energy costs of initializing laser radiation in the infrared wavelength range.

**Keywords:** chemical laser, chemical reaction, photon-branched chain reaction, hydrogen fluoride, laser medium, inducing photon.

Введение. В данной научной статье рассматриваются особенности конструкции, принцип работы, а также способы улучшения технических характеристик типового химического лазера (ХЛ) в части его энергопотребления. Целью исследования является анализ принципа работы ХЛ, активной средой которого является фтористый водород HF и поиск возможности использования таких химических реакций (ХР), в процессе которых часть энергии излучаемых фотонов расходуется на диссоциацию молекулы фтора  $F_2$  на свободные атомы. Техническая реализация таких ХР в ХЛ позволяет снизить энергетические затраты на инициализацию лазерного излучения. В первой части научной статьи представлены состав и описание принципов работы типового ХЛ. Вторая часть статьи содержит описание одного из возможных вариантов снижения энергопотребления последнего. Методической основой для проведения научного исследования являются положения и нормы, достаточно чётко и подробно описанные в [1, с. 52-59], [2, с. 14-26], [3, с. 13-35], а также в [4, с. 100-102]. Такой научно-методический подход используется в трудах [5, с. 15-16], [6, с. 18-48], [7, с. 44-45] и [8, с. 75-81] для поиска способов совершенствования конструкции и улучшения технических характеристик ХЛ.

Общая характеристика ХЛ. ХЛ – это оптический квантовый генератор, формирующий излучение за счёт протекания в нём ХР. Именно в процессе протекания ХР выделяется энергия, необходимая для формирования лазерного излучения. Поэтому, в отличие от других типов лазеров, ХЛ не требуется накачка активной среды. Данное обстоятельство является характерной особенностью ХЛ, когда химическая энергия напрямую конвертируется в энергию электромагнитного излучения. Рабочим диапазоном излучения ХЛ является, как правило, инфракрасный диапазон длин волн.

Внешний вид типовых лазерных установок, собранных на базе ХЛ, представлен на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1. – Лазерные установки и комплексы, собранные на базе ХЛ  
(а – кислородно-йодный лазер [9]; б – наземный автономный лазерный комплекс [10]).

Основными компонентами ХЛ являются рабочее вещество и устройство инициирования ХР (рисунок 2).

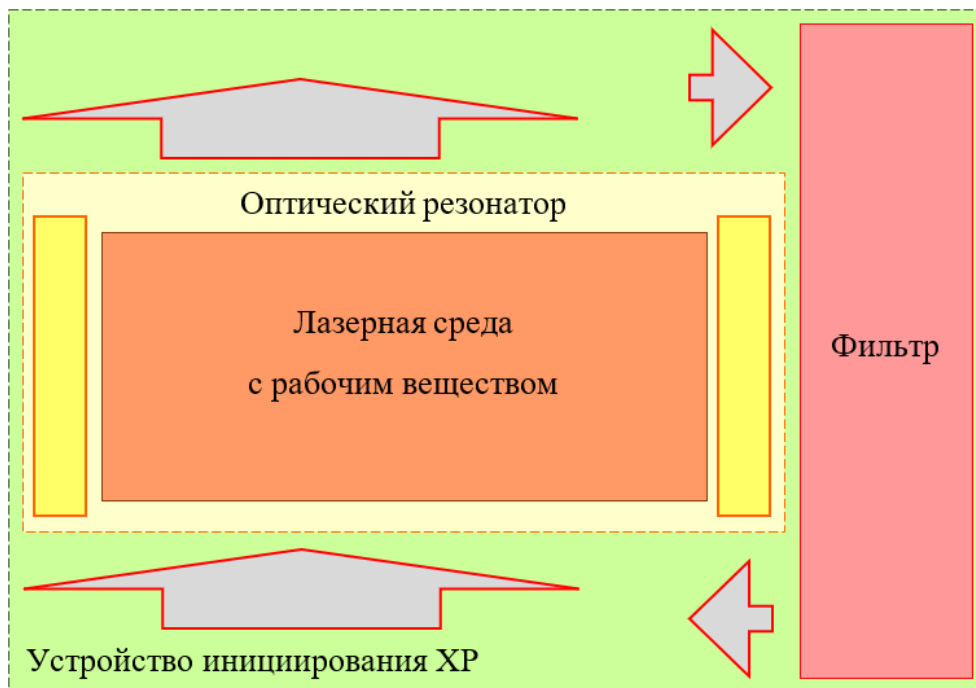


Рисунок 2 – Основные компоненты ХЛ

Как видно из рисунка 2 через лазерную среду, где с помощью внешнего источника энергии вызывается диссоциация вещества активной среды, происходит циркуляция рабочего вещества, находящегося в устройстве инициирования ХР. Для связывания молекулярной структуры рабочего вещества используется фильтр.

Для большинства рассматриваемого типа лазеров характерны экзотермические ХР – ХР с выделением тепла, которое в дальнейшем частично идёт на заполнение верхних колебательно-вращательных уровней электронов атомов, входящих в состав молекул веществ, вступающих в ХР.

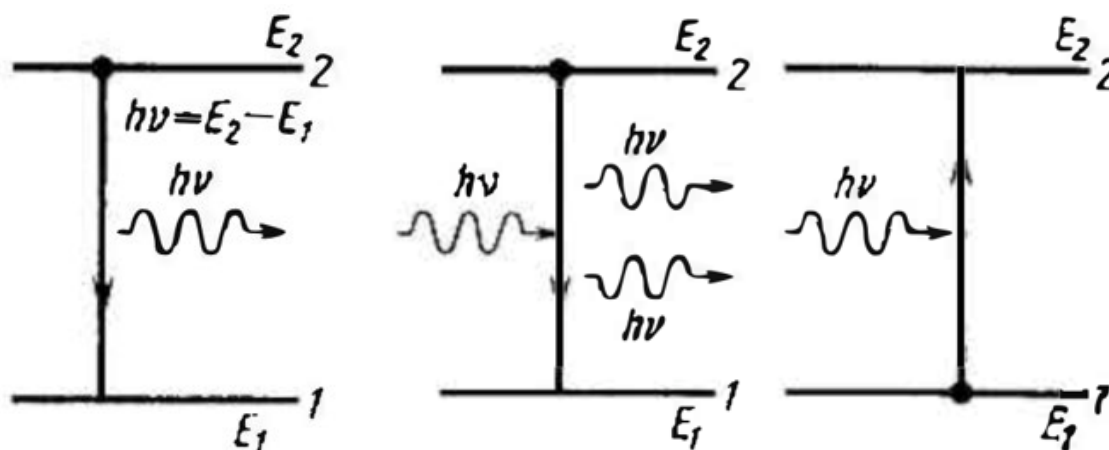
Известно [11, с. 33-39], что индуцированное излучение лазера представляет собой испускание очередной частицы света – фотона при переходе квантовой системы из одного вида энергетического состояния в другое под воздействием индуцирующего фотона, энергия которого определяется разностью энергетических уровней этих состояний. Индуцирующий вынужденное излучение и индуцированный фотон являются полностью идентичными. При воздействии фотона на двухуровневую квантовую систему возможны три ситуации (рисунок 3):

а) спонтанное излучение, происходящее при переходе квантовой системы из возбужденного энергетического состояния в основное.

б) вынужденное излучение, происходящее при переходе квантовой системы из возбужденного состояния в основное за счёт воздействия извне индуцирующего фотона. В квантовую систему попадает один фотон, переводит систему в основное состояние, которая испускает точно такой же фотон. При воздействии излучения вероятность возникновения факта индуцированного перехода и интенсивность вынужденного излучения зависят от

населённости возбужденного состояния квантовой системы и от интенсивности возбуждающего излучения.

в) поглощение, происходящее при переходе квантовой системы из основного состояния в возбужденное.



а)

б)

в)

Рисунок 3. – Схематическое изображение возможных результатов воздействия фотона на двухуровневую квантовую систему (а – спонтанное испускание; б – вынужденное испускание; в – поглощение) [12].

При рассмотрении случая воздействия на систему потока фотонов вероятность поглощения зависит от интенсивности и от населённости основного состояния. При термодинамическом равновесии активного вещества распределение электронов его атомов по уровням математически описывается распределением Больцмана. При этом, на верхнем энергетическом уровне электронов меньше, чем на нижнем. Значения вероятностей вышеописанных процессов определяются населённостью энергетических уровней. В обычных условиях вынужденное испускание наблюдается гораздо реже, чем спонтанное испускание или поглощение. В случае инверсии населённостей, когда на верхнем энергетическом уровне находится большее число электронов чем на нижнем, за счёт спонтанного излучения фотонов можно добиться их значительного преумножения благодаря процессу вынужденного испускания. Другими словами, в лазере обычно происходит лавинообразный съём инверсной населённости электронов, и количество спонтанно излучённых фотонов возрастает в разы. Это происходит потому, что при каждом вынужденно испускаемом фотоне генерируется два абсолютно идентичных фотона.

В ХЛ создание инверсной населённости электронов с помощью накачки не требуется. Получение активного вещества, например, фтороводорода  $HF$ , реализуется с помощью одной из двух реакций [12]:

горячая реакция, которая относится к экзотермическим ХР, при которой выделяется приблизительно  $Q = 98$  [ккал/моль] тепла



холодная реакция, которая относится к экзотермическим ХР, при которой выделяется приблизительно  $Q = 32$  [ккал/моль] тепла



Инверсная населённость в лазере, работающем на фтороводороде  $HF$ , достигается двумя путями:

1) В ходе реакции атомарного фтора  $F$  и молекулярного водорода  $H_2$  выделяется тепло в количестве приблизительно  $Q = 32$  [ккал/моль], что может пойти на возбуждение молекулы фтороводорода  $HF$  вплоть до колебательного уровня  $\nu = 6$ .

2) Время релаксации разных колебательных состояний различны, при этом время релаксации состояния  $\nu = 2$  наибольшее по сравнению с другими уровнями. Это приводит к инверсной населённости между состоянием  $\nu = 2$  и состоянием  $\nu = 1$  [12].

Лазер на фтороводороде  $HF$  может излучать сразу на нескольких линиях излучения за счет каскадной генерации. При вынужденной генерации на переходе  $\nu = 2 \rightarrow \nu = 1$  населённость уровня  $\nu = 2$  снижается, что может привести к инверсной населённости между уровнями  $\nu = 3$  и  $\nu = 2$ . В то же время при генерации  $\nu = 2 \rightarrow \nu = 1$  происходит увеличение населённости на уровне  $\nu = 1$ , что может привести к генерации между уровнями  $\nu = 1$  и  $\nu = 0$ .

Следует отметить, что в том же фтороводородном ХЛ возможна генерация и между вращательными уровнями. Энергия испускаемого кванта при переходе между вращательными уровнями внутри одного колебательного меньше энергии кванта, испускаемого при переходе молекулы между колебательными состояниями. Таким образом, при одновременной генерации между колебательными состояниями и вращательными состояниями фтороводородный ХЛ будет обладать широкополосным спектром излучения.

ХЛ не нуждаются в традиционной накачке, присущей твердотельным и газовым лазерам. При этом, любому ХЛ необходим своего рода «триггер», инициирующий начало его работы. В случае непрерывного лазерного излучения, этим «триггером» может служить процесс смешивания газов из разных баллонов. В случае работы лазера в импульсном режиме, процесс инициации требует затрат энергии сопоставимых с количеством энергии, генерируемой в лазерном импульсе. Обычно для инициации излучения в импульсном режиме используется излучение ультрафиолетовой лампы или электронный пучок. Длительность излучаемых импульсов при этом составляет порядка  $\tau_{\text{и}} \approx 10^{-6} \dots 10^{-9}$  [с]. Следовательно, для обеспечения импульсного лазерного излучения с энергией в импульсе, например, приблизительно равной  $E_{\text{и}} = 10^5$  [Дж], необходимо обеспечить инициирующий процесс в виде импульсов ультрафиолетового излучения с величиной энергии, сопоставимой с  $10^5$  [Дж]. Поскольку данная задача с технической точки зрения является достаточно сложной, в этом заключается серьёзный недостаток ХЛ.

Снижение энергопотребления ХЛ. Для разрешения проблемы снижения энергозатрат на инициализацию работы ХЛ в импульсном режиме, предлагается использование фотонно-разветвленные цепные реакции (ФРЦР). Идея ФРЦР заключается в принятии участия лазерного фотона в процессе диссоциации молекулы фтора  $F_2$  на два свободных атома фтора  $F$ . При этом, количество фотонов, необходимое для создания одного атома фтора  $F$  не должно превышать числа фотонов, генерируемых в ходе вынужденного испускания. В такой квантовой системе происходит активное нарастание количества фотонов и атомов фтора  $F$  до полного выгорания реагентов.

В случае однофазной лазерной среды ФРЦР оказывается невозможной из-за того, что спектр лазерного излучения фтороводорода  $HF$  лежит в инфракрасном диапазоне длин волн. Фотонам, соответствующим таким длинам волн недостаточно энергии для диссоциации молекулы фтора  $F_2$ . Для обеспечения достаточного количества энергии необходим фотон, соответствующий длине волны ультрафиолетового диапазона. Величина энергии такого фотона составляет приблизительно  $E_f \approx 4$  [эВ].

Если в качестве лазерной среды используется двухфазная среда, когда имеют место рабочий газ в виде фтороводорода  $HF$  и ультрадисперсные пассированные частицы

металла, например, алюминия  $Al$ . Под действием некоторого  $n$ -го количества фотонов лазерного излучения с энергией

$$E_f \approx h \cdot \nu \quad (3)$$

частицы алюминия  $Al$  испаряются, переходя в газ



Далее этот газ может вступить в реакцию с фтором  $F_2$ , создав атомарный фтор  $F$ .



Оптическая схема трёхкаскадной лазерной системы с усилением по энергии  $G$ , реализующей ФРЦР представлена на рисунке 4.

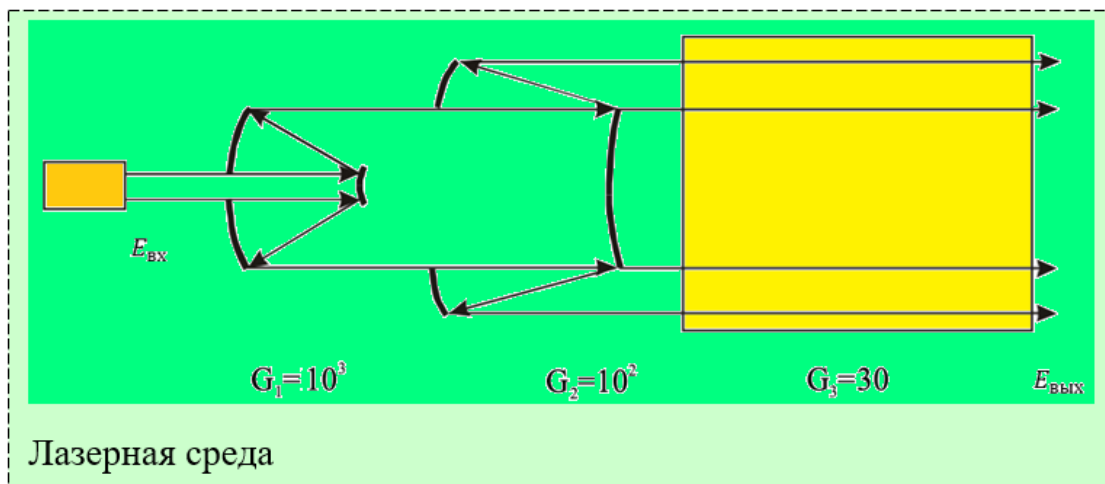


Рисунок 4. - Оптическая схема трёхкаскадной лазерной системы с усилением по энергии:  $\frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 3 \cdot 10^6$  [13].

Из рисунка 4 видно, что генератор в малом объёме инициирует ФРЦР. Генерация лазерного излучения происходит лавинообразно. При усилении по энергии в  $3 \cdot 10^6$  раз лазерная система остается устойчивой к самовозбуждению ввиду отсутствия в ней инверсной населённости без инициализации.

Техническая реализация трёхкаскадной лазерной системы с усилением связана с рядом трудностей:

необходимо создавать дисперсные частицы металла оптимальных размеров и концентрации;

ввиду того, что дисперсные частицы металла с течением времени коагулируют между собой, необходима наибо́льшая инициализация генерации лазерного излучения.

Рассмотренный вариант улучшения технических характеристик ХЛ в части энергопотребления не является единственным. Другие возможные пути снижения потребляемой мощности ХЛ достаточно подробно рассмотрены в [14, с. 12-14], [15, с. 5-6], [16, с. 28-38], [17, с. 24-35] и [18, с. 65-71].

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно сформулировать следующие выводы:

разобран обобщённый принцип работы типового ХЛ, активной средой которого является фтороводород  $HF$ . Отмечен серьёзный недостаток работающих в импульсном режиме ХЛ, связанный с тем, что энергия, затрачиваемая на процесс инициации процесса генерации лазерного излучения, сопоставима по величине с энергией излучения самого лазера.

представлен один из возможных вариантов решения проблемы, связанной с энергозатратами на излучение ХЛ в импульсном режиме. Решение связано с

использованием ФРЦР, в ходе которых часть излучаемых фотонов идёт на процессы, направленные на диссоциацию молекулы фтора  $F_2$ . Для реализации данного способа необходимо добавление в лазерную среду дисперсных частиц алюминия  $Al$ .

обоснованы трудности технической реализации трёхкаскадной лазерной системы с усилением, в которой предусмотрено использование ФРЦР.

### Список литературы:

1. Casper J. Ultee, Chemical Lasers and Their Applications // Journal of Chemical Education - 1982. - URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed059p462> (дата обращения: 23.12.23).
2. Mike Follows, Chemistry with lasers // Royal society of chemistry 2012. - URL: <https://edu.rsc.org/feature/chemistry-with-lasers/2020116.article> (дата обращения: 23.12.23).
3. Bashkin A. S., Kupriyanov N. L., Oraevskiy A. N. Chemical laser emitting visible radiation as a result of oxidation reactions // American Institute of Physics - 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE1977v007n05ABEH012568> (дата обращения: 23.12.23).
4. Markus Werner Sigrist Chemische Laser (chemical lasers) // Laser: Theorie, Typen und Anwendungen - 2018. - URL: [https://www.researchgate.net/publication/327397520\\_Chemische\\_Laser\\_chemical\\_lasers](https://www.researchgate.net/publication/327397520_Chemische_Laser_chemical_lasers) (дата обращения: 23.12.23).
5. William Q. Jeffers, Short wavelength chemical lasers // AIAA Journal - 2012. - URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.10095> (дата обращения: 23.12.23).
6. Kovalev M., Podlesnykh I. Efficient Broadband Light-Trapping Structures on Thin-Film Silicon Fabricated by Laser, Chemical and Hybrid Chemical/Laser Treatments // Advances in Plasma and Laser Engineering - 2023. - URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/6/2350> (дата обращения: 24.12.23).
7. Jhanis Gonzalez, Article on Laser Ablation Chemical Analysis - LIBS, LA-ICP-MS/OES, and LAMIS // Applied Spectra Transforming the way the world does chemistry - 2017. - URL: <https://appliedspectra.com/article-la-chemical-analysis-review.html> (дата обращения: 24.12.23).
8. Ораевский А. Н. Химические лазеры // Соросовский образовательный журнал, №4 - 1999. - URL: <https://studylib.ru/doc/2350368/himicheskie-lazery> (дата обращения: 24.12.23).
9. Кислород-йодный лазер // Лазер-портал: [сайт]. URL: [https://laserportal.ru/content\\_285](https://laserportal.ru/content_285) (дата обращения: 20.01.24).
10. Наземный автономный лазерный комплекс // Лазер-портал: [сайт]. URL: [https://laserportal.ru/content\\_1105](https://laserportal.ru/content_1105) (дата обращения: 20.01.24).
11. Игошин В. И., Катулин В. А. Химический лазер на фотонно-разветвленной цепной реакции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2000. - Т. 2. - №. 1. - С. 33-39.
12. Звелто О. Принципы лазеров. Издание третье переработанное и дополненное - Москва: Мир, 1990. - 559 с.

13. Савва В. А. Лазеры, селективное возбуждение молекул и управление химическими реакциями – фемтохимия // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика – 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazery-selektivnoe-vozbuzhdenie-molekul-i-upravlenie-himicheskimi-reaktsiyami-femtohimiya> (дата обращения: 23.12.23).
14. Erich Grosse, Christian Weissmantel Chemie selbst erlebt. Das kannst auch du das chemie-experimentierbuch 2-е русское изд. – Л.:Химия, 1985 – Лейпциг, 1974. – URL: <https://xumich.ucoz.ru/books/Grosse.pdf> (дата обращения: 24.12.23).
15. Елецкий Л. В. Процессы в химических лазерах // Успехи физических наук – 1981. – URL: [https://ufn.ru/ufn81/ufn81\\_6/Russian/r816b.pdf](https://ufn.ru/ufn81/ufn81_6/Russian/r816b.pdf) (дата обращения: 24.12.23).
16. Харанжевский Е. В., Кривилёв М. Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Учебное пособие. Под общей редакцией П. К. Галенко. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011. – 187 с.
17. Башкин А. С., Игошин В. И., Ораевский А. Н., Щеглов В. А. Химические лазеры / Под ред. Н. Г. Басова. – Москва: Наука, 1982. – 400 с.
18. Аблеков В.К., Денисов Ю.Н., Прошкин В.В. Химические лазеры / В.К. Аблеков, Ю.Н. Денисов, В.В. Прошкин / Под ред. В.С. Авдуревского. – Москва: Атомиздат, 1980. – 224 с.

#### References:

1. Casper J. Ultee, Chemical Lasers and Their Applications // Journal of Chemical Education – 1982. – URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed059p462> (accessed: 12/23/23).
2. Mike Follows, Chemistry with lasers // Royal Society of chemistry 2012. – URL: <https://edu.rsc.org/feature/chemistry-with-lasers/2020116.article> (date of application: 12/23/23).
3. Bashkin A. S., Kupriyanov N. L., Oraevsky A. N. Chemical laser emitting visible radiation as a result of oxidation reactions // American Institute of Physics – 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE1977v007n05ABEH012568> (accessed: 12/23/23).
4. Markus Werner Sigrist Chemische Laser (chemical lasers) // Laser: Theory, Typen und Anwendungen – 2018. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/327397520\\_Chemische\\_Laser\\_chemical\\_lasers](https://www.researchgate.net/publication/327397520_Chemische_Laser_chemical_lasers) (date of application: 12/23/23).
5. William Q. Jeffers, Short wavelength chemical lasers // AIAA Journal – 2012. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.10095> (date of application: 12/23/23).
6. Kovalev M., Podlesnykh I. Efficient Broadband Light-Trapping Structures on Thin-Film Silicon Fabricated by Laser, Chemical and Hybrid Chemical/Laser Treatments // Advances in Plasma and Laser Engineering – 2023. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/6/2350> (date of request: 12/24.23).
7. Jhanis Gonzalez, Article on Laser Ablation Chemical Analysis – LIBS, LA-ICP-MS/OES, and LAMIS // Applied Spectra Transforming the way the world does chemistry – 2017. –



- URL: <https://appliedspectra.com/article-la-chemical-analysis-review.html> (date of reference: 12/24.23).
8. Oraevsky A. N. Chemical lasers // Sorosovsky educational journal, No.4 - 1999. - URL: <https://studylib.ru/doc/2350368/himicheskie-lazery> (date of access: 12/24.23).
  9. Oxygen-iodine laser // Laser portal: [website]. URL: [https://laserportal.ru/content\\_285](https://laserportal.ru/content_285) (date of application: 01/20/24).
  10. Ground-based autonomous laser complex // Laser portal: [website]. URL: [https://laserportal.ru/content\\_1105](https://laserportal.ru/content_1105) (date of reference: 01/20/24).
  11. Igoshin V. I., Katulin V. A. Chemical laser based on a photon-branched chain reaction // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2000. - Vol. 2. - No. 1. - pp. 33-39.
  12. Zvelto O. Principles of lasers. The third edition, revised and supplemented - Moscow: Mir, 1990. - 559 p.
  13. Savva V. A. Lasers, selective excitation of molecules and control of chemical reactions - femtochemistry // The works of BSTU. Series 3: Physical and Mathematical Sciences and Computer Science - 2018. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazery-selektivnoe-vozbuzhdenie-molekul-i-upravlenie-himicheskimi-reaktsiyami-femtohimiya> (accessed: 12/23/23).
  14. Erich Grosse, Christian Weissmantel Chemie selbst erlebt. Das kannst auch du das chemie-experimentierbuch 2nd Russian edition - L.:Chemistry, 1985 - Leipzig, 1974. - URL: <https://xumich.ucoz.ru/books/Grosse.pdf> (date of request: 12/24.23).
  15. Yeletsky L. V. Processes in chemical lasers // Successes of physical sciences - 1981. - URL: [https://ufn.ru/ufn81/ufn81\\_6/Russian/r816b.pdf](https://ufn.ru/ufn81/ufn81_6/Russian/r816b.pdf) (date of reference: 12/24.23).
  16. Kharanzhevsky E. V., Krivilev M. D. Laser physics, laser technologies and methods of mathematical modeling of laser effects on matter. A study guide. Under the general editorship of P. K. Galenko. Izhevsk: Publishing house "Udmurt University", 2011. - 187 p.
  17. Bashkin A. S., Igoshin V. I., Oraevsky A. N., Shcheglov V. A. Chemical lasers / Edited by N. G. Basov. - Moscow: Nauka, 1982. - 400 p.
  18. Ablekov V.K., Denisov Yu.N., Proshkin V.V. Chemical lasers / V.K. Ablekov, Yu.N. Denisov, V.V. Proshkin / Edited by V.S. Avduevsky. - Moscow: Atomizdat, 1980. - 224 p.