

В.И. Зубков

ДВИГАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СО ВСТРОЕННЫМИ ТОЧКАМИ ОПОРЫ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ (VCSEL) ДВИГАТЕЛЕЙ EMDRIVE

Аннотация. Предложена концепция твердотельного лазерного двигателя EmDrive в виде VCSEL-структуры (VCSEL-EmDrive-двигателя). Рассмотрена микроэлектронная двигательная система с электронно-контролируемыми VCSEL-EmDrive-двигателями, используемыми в качестве точек опоры, и MEMS-актюаторами, обеспечивающими ускорение транспортных средств по отношению к неускоряющимся точкам опоры. Показана высокая энергетическая эффективность подобных двигательных систем, сопоставимость их энергетической эффективности с энергетической эффективностью реактивного двигателя и автомобильного двигателя внутреннего сгорания при ускорении автомобиля, а также независимость энергетической эффективности подобных двигательных установок от скорости транспортного средства при незначительных релятивистских эффектах. Приведен эскиз футуристического космического корабля с микроэлектронной двигательной установкой.

Ключевые слова: EmDrive, propellant-less propulsion, VCSEL, MEMS.

V.I. Zubkov

PROPULSION SYSTEM WITH BUILT-IN LASER (VCSEL) EMDRIVE ENGINE-BASED SUPPORT POINTS

Abstract. Concept of solid-state VCSEL-based EmDrive engine (VCSEL-EmDrive engine) is proposed. Microelectronic propulsion system containing arrays of VCSEL-EmDrive engines used as switchable built-in support points and MEMS actuators used for vehicle acceleration with respect to non-accelerating VCSEL-EmDrive engine-based support points is considered. High energy efficiency of such propulsion systems, its comparability with that of the jet engines and internal-combustion car engines at car acceleration is displayed and its vehicle velocity independence under negligible relativistic effects is shown as well. Draft of futuristic spacecraft with microelectronic propulsion system is presented.

Keywords: EmDrive, propellant-less propulsion, VCSEL, MEMS.

Введение

Двигатели EmDrive [9] с высокой добротностью резонатора могут иметь невероятно высокую энергетическую эффективность (отношение силы тяги к мощности), но микроволновые двигатели EmDrive с высокой добротностью резонатора имеют значительные массу и габариты, требуют криогенного охлаждения, и сила тяги подобных двигателей быстро уменьшается с ускорением [9; 10]. Уменьшение силы тяги двигателя EmDrive с ускорением обусловлено накапливающейся разницей доплеровского сдвига частоты микроволн при отражении от противоположных торцов резонатора вследствие неодинаковости скоростей микроволн [10] и уменьшением добротности ускоряющегося резонатора вследствие изменения длин путей электромагнитных волн за время их пролета между торцами ускоряющегося резонатора [16]. Уменьшение добротности ускоряющегося резонатора быстро увеличивается с частотой электромагнитных колебаний [16], что ограничивает применение оптических (лазерных) двигателей EmDrive.

Зубков Виктор Иванович

кандидат технических наук. Независимый исследователь, Зеленоград (Москва). Сфера научных интересов: разработка микросхем; системы технического зрения; СВч; двигатель EmDrive. автор 20 научных публикаций.

Электронный адрес: vzbv@yandex.ru

Для исключения уменьшения силы тяги двигателей EmDrive с ускорением ранее было предложено использовать высокодобротные двигатели EmDrive в качестве электронно-контролируемых точек опоры, к которым могут притягиваться или от которых могут отталкиваться ускоряющиеся транспортные средства [1]. Двигатели EmDrive, используемые в качестве точек опоры для ускоряющихся транспортных средств, работают в циклическом режиме, они включаются и выключаются. Сила тяги включенных двигателей EmDrive компенсируется силой, с которой ускоряющиеся транспортные средства отталкиваются от работающих двигателей EmDrive (или притягиваются к указанным двигателям). Затем включенные двигатели EmDrive выключаются, перемещаются вперед, и процесс повторяется. В результате включенные двигатели EmDrive двигаются без ускорения, что позволяет исключить уменьшение их силы тяги с ускорением, и что, в свою очередь, позволяет использовать микроволновые двигатели EmDrive с ультравысокой добротностью резонатора и, соответственно, с ультравысокой энергетической эффективностью, а также компактные оптические двигатели EmDrive, не требующие криогенного охлаждения [15–17]. Существенным недостатком микроволновых двигателей EmDrive с резонаторами высокой добротности при их использовании в качестве электронно-контролируемых точек опоры является очень большая постоянная времени резонаторов. Отталкиваясь от переключающихся с низкой частотой переключения точек опоры (или притягиваясь к ним), транспортное средство приобретает значительную скорость и проходит значительное расстояние по отношению к указанным неускоряющимся точкам опоры, что требует значительной мощности, расходуемой на выполнение механической работы (быстро увеличивающейся с увеличением приращений скорости транспортного средства по отношению к неускоряющимся точкам опоры), и значительных размеров транспортного средства [16]. Оптические резонаторы могут иметь достаточно высокую добротность и очень небольшую постоянную времени; хорошо известно, что лазеры обычно характеризуются очень высоким быстродействием. Поэтому создание двигательных систем с оптическими двигателями EmDrive является весьма актуальной задачей.

В работе [17] была предложена концепция оптического (лазерного) двигателя EmDrive, состоящего из резонатора с плоскопараллельными зеркалами, прозрачного диэлектрика, прикрепленного к одному из зеркал, вакуумной полости, расположенной между диэлектриком с антиотражающим покрытием и вторым зеркалом. Очевидно, что в качестве диэлектрика может использоваться активная среда лазера. Движущиеся в противоположных направлениях лучи света создают стоячую волну в резонаторе. Стоячая волна в резонаторе не движется и не создает давление на торцы резонатора при отражении. Сила тяги подобного двигателя представляет собой ответную реакцию на суммарное изменение импульсов движущихся навстречу друг другу ускоряющегося и замедляющегося лучей света при пересечении антиотражающего покрытия.

Для создания оптических (лазерных) двигателей EmDrive весьма перспективно применение поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL, в дальнейшем VESEL-лазеров), характеризующихся небольшими размерами, высокими быстродействием, эффективностью ($\approx 50\%$) и плотностью мощности ($\approx 1 \text{ кВт/см}^2$) излучения, способностью работать при высокой температуре (до 80°C), планарной технологией и др. [7]. Разновидностью поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL) являются поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным внешним резонатором (VECSEL [14], в дальнейшем VECSEL-лазеры). Приведенная в [17] конструкция лазерного двигателя EmDrive напоминает конструкцию VECSEL-лазера. Возможность использования VECSEL-лазеров (разумеется, с зеркалами, обладающими максимально высоким коэффициентом отражения) в качестве двигателей EmDrive отмечалась в работах [15; 16]. Наличие вакуумной полости позволяет получить значительные изменения скоростей лучей света при пересечении границы диэлектрика с антиотражающим покрытием и вакуума. Однако полностью твердотельная конструкция имеет ряд очевидных преимуществ перед конструкцией, содержащей вакуумную (или воздушную) полость. Для специалистов возможность замещения вакуумной полости прозрачным диэлектриком является очевидной, однако вопрос о создании полностью твердотельного (без вакуумной полости) лазерного двигателя EmDrive, выполненного в виде VCSEL-структуры, то есть изготавливаемого полностью по микроэлектронной технологии, является достаточно интересным и заслуживает более подробного рассмотрения.

В настоящей работе предложена конструкция полностью твердотельного лазерного двигателя EmDrive, изготавливаемого в виде VCSEL-структуры (VCSEL-EmDrive-двигателя), приведена оценка энергетической эффективности подобного двигателя, рассмотрено применение подобных двигателей в качестве электронно контролируемых точек опоры для ускоряющихся транспортных средств.

Двигательная система со встроенными точками опоры на основе лазерных (VCSEL) двигателей EmDrive

В работе [11] приведена структура VCSEL-лазера с зеркалами Брэгга [4], существенно различающимися профилем показателей преломления. Минимальные величины показателей преломления зеркал Брэгга различны в структуре, приведенной в данной работе. Это позволяет использовать их для отражения лучей света, распространяющихся в прозрачных диэлектриках с различными показателями преломления. Использование прозрачных диэлектриков с различными показателями преломления позволяет создавать полностью твердотельные лазерные двигатели EmDrive.

Схематичное представление конструкции лазерного двигателя EmDrive в виде VCSEL-структуры (VCSEL-EmDrive-двигателя), приведено на Рисунке 1. Представленная конструкция аналогична известной конструкции лазерного двигателя EmDrive [17], но вместо вакуумной полости резонатора используется диэлектрический разделитель (spacer), позволяющий получить полностью твердотельную VCSEL-структуру. Зеркала Брэгга с высоким коэффициентом отражения содержат достаточно большое количество слоев, однако интенсивность стоячей волны в резонаторах с зеркалами Брэгга быстро убывает на ее концах, поэтому резонатор VCSEL-лазера может характеризоваться эффективной длиной [5]. На Рисунке 1 показана только часть резонатора со значительной интенсивностью стоячей волны.

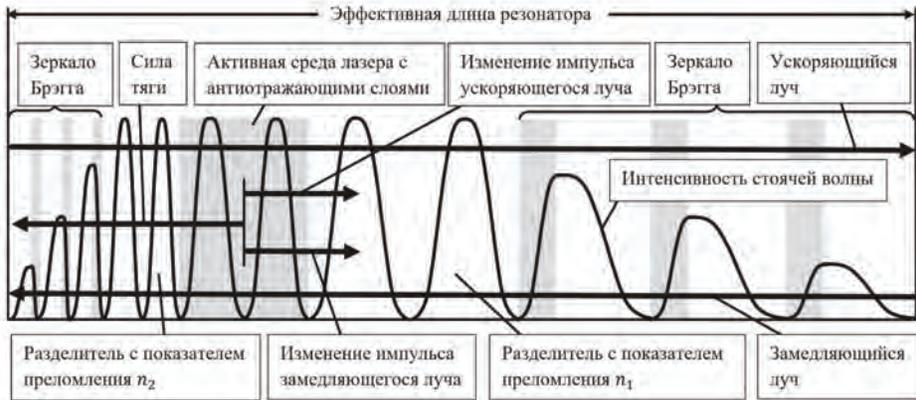


Рисунок 1. Схематичное представление конструкции лазерного двигателя EmDrive в виде VCSEL-лазера

Рассматриваемый двигатель EmDrive содержит активную область, антиотражающие покрытия с обеих сторон активной области, разделители, соединенные с антиотражающими покрытиями, и зеркала Брэгга. Разделители отделяют активную среду лазера с антиотражающими покрытиями от зеркал Брэгга. Зеркала Брэгга рассчитаны на максимальное отражение света. Показатели преломления разделителей различные, поэтому скорости световых лучей в разделителях тоже различные. При работе лазера движущиеся в противоположных направлениях световые лучи создают стоячую волну. Стоячая волна не движется и не создает давление на зеркала Брэгга при отражении лучей, так как в стоячей волне импульсы движущихся в противоположных направлениях ее компонент взаимно уничтожают друг друга. Суммарный импульс стоячей волны равен нулю. Однако скорость света в разделителе с относительно низким показателем преломления выше скорости света в разделителе с относительно высоким показателем преломления. То есть средние (учетом слоистой структуры VCSEL-лазеров) скорости движущихся между зеркалами в противоположных направлениях световых лучей, создающих стоячую волну, изменяются вследствие различия показателей преломления разделителей. Замедление (отрицательное среднее ускорение) замедляющегося луча совпадает со средним ускорением ускоряющегося луча; изменения импульсов движущихся в противоположных направлениях ускоряющегося и замедляющегося лучей складываются. Скорости света в диэлектриках и средние ускорения лучей света в резонаторе жестко привязаны к скорости света в вакууме, поэтому среднее ускорение лучей, суммарное изменение импульсов лучей и, следовательно, изменение импульса стоячей волны жестко привязано к скорости света в вакууме. Скорость света в вакууме является постоянной в любой инициальной системе отсчета и не зависит от скорости резонатора. Сила тяги двигателя – ответная реакция резонатора на одинаковое изменение импульсов движущихся в противоположных направлениях лучей при прохождении вдоль резонатора. Так как двигающиеся навстречу друг другу микроволны создают стоячую, то есть неподвижную, волну, двигатели EmDrive можно считать двигателями без движущихся частей. Соответственно, VCSEL-EmDrive-двигатель можно считать полностью твердотельным двигателем без движущихся частей.

В работе [9] приведена формула сила тяги двигателя EmDrive, связывающая мощность, число отражений микроволн и разность групповых скоростей микроволн у торцов

резонатора. Однако более привычным параметром резонатора, определяющим способность накапливать энергию и число отражений микроволн от торцов резонатора, является добротность. Очевидно, что энергетическая эффективность двигателя EmDrive определяется добротностью его резонатора [9; 10].

В работе [17] энергетическая эффективность лазерного двигателя EmDrive выражена через добротность оптического резонатора, которая зависит от величины потерь и длины резонатора [8]. Так как активные области и, соответственно, длина VCSEL-лазеров могут быть очень коротким, энергетическую эффективность двигателей EmDrive, выполненных в виде VCSEL-лазера, удобно выражать через потери при отражении от зеркал.

Сила тяги F_t (и, соответственно, энергетическая эффективность) VCSEL-EmDrive-двигателя может быть легко оценена следующим образом.

Пусть n_1 и n_2 – показатели преломления разделителей (для определенности пусть $n_2 > n_1$); Δv – изменение средних скоростей; Δp – суммарное изменение импульсов лучей при переходе из одного разделителя в другой; Δt – время прохождения света в одну сторону в резонаторе (предполагается, что резонатор имеет некоторую эффективную длину [5]); E , m и f – соответственно, энергия, масса энергии и частота световых волн в резонаторе; L – эффективное число длин полуволн в резонаторе; c – скорость света в вакууме; P – мощность создаваемого в резонаторе излучения; Q – добротность оптического резонатора [8]; l – величина потерь (round trip loss) в оптическом резонаторе [8], определяемая главным образом потерями при отражении от двух зеркал. Тогда

$$\begin{aligned}
 F_t &= -\frac{\Delta p}{\Delta t} = -\frac{m\Delta v}{\Delta t} = -\frac{mc\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)}{\Delta t} = -\frac{E}{c^2}c\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right) = -\frac{Ec\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)}{\frac{L}{2f}} = \\
 &= -\frac{\frac{PQ}{2\pi f}c\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right)}{c^2\frac{L}{2f}} = -\frac{PQ}{\pi Lc}\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right) = -\frac{2P}{lc}\left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}\right).
 \end{aligned}$$

Таким образом, энергетическая эффективность подобного оптического (лазерного) двигателя EmDrive не зависит от длины резонатора и определяется коэффициентами отражения зеркал. Это объясняется тем, что энергия, накопленная в резонаторе, пропорциональна, а среднее ускорение лучей, распространяющихся в резонаторе, обратно пропорционально его длине. Следовательно, оптический двигатель EmDrive может быть достаточно коротким. Изготовленные в виде многослойных диэлектриков так называемые суперзеркала могут иметь коэффициент отражения более 99,9999 % [13]. При величине потерь вследствие двух отражений от зеркал (round triploss) $l \approx 2 \times 10^{-6}$ [9], $n_2 = 2$ и $n_1 = 1,5$, энергетическая эффективность лазерного двигателя EmDrive может составлять примерно 0,5 Н/кВт = 0,15 с/км. Хорошо известно, что энергетическая эффективность (отношение силы тяги к мощности) реактивного двигателя η может быть оценена как отношение импульса к энергии молекул, вылетающих из сопла, и выражена через скорость

выхлопа реактивной струи v_e , то есть $\eta = \frac{2}{v_e}$ (энергетическая эффективность реактивного двигателя уменьшается с увеличением скорости выхлопа). Типичные скорости выхлопа реактивных двигателей превышают 1 км/с [12], потому энергетическая эффективность двигателей EmDrive в виде VCSEL-лазеров, работающих практически без рабочего тела (так как масса энергии, действующей как рабочее тело, незначительна), теоретически может быть вполне сравнима с энергетической эффективностью реактивного двигателя. Пересчитав крутящий момент автомобильного двигателя внутреннего сгорания при заданной скорости вращения коленчатого вала в силу, ускоряющую автомобиль, несложно получить оценочное значение энергетической эффективности автомобильного двигателя. Например, при крутящем моменте двигателя автомобиля «Нива» 116 Нм, скорости вращения коленчатого вала 3400 об/мин [2], увеличении крутящего момента трансмиссии примерно в 20 раз [3] и радиусе колес автомобиля 0,5 м энергетическая эффективность автомобильного двигателя составляет примерно 0,1 с/м. Таким образом, теоретическая энергетическая эффективность двигателей EmDrive, в том числе микроэлектронного лазерного двигателя EmDrive, выполненного в виде VCSEL-структуры, может быть сопоставима с энергетической эффективностью автомобильного двигателя.

Недостатком реактивного двигателя является необходимость тратить энергию на ускорение частиц газа, вылетающих из сопла, недостатком автомобильного двигателя – снижение силы тяги с увеличением скорости. От указанных недостатков практически свободна двигательная система со встроенными точками опоры на двигателях EmDrive, потому что энергия не расходуется на ускорение указанных точек опоры, и ускоряющееся транспортное средство приобретает весьма незначительную скорость по отношению к неускоряющимся встроенным точкам опоры [16]. В связи с этим можно ожидать, что двигательные системы со встроенными точками опоры на основе электронно-управляемых двигателей EmDrive помимо работы практически без рабочего тела (так как масса энергии, используемой в качестве рабочего тела, пренебрежимо мала) будут весьма эффективными энергетически, причем энергетическая эффективность подобных двигательных систем повышается с частотой переключения двигателей EmDrive [16].

Двигательные системы со встроенными электронно-контролируемыми точками опоры на лазерных двигателях EmDrive могут работать с малыми временами переключения двигателей, малыми перемещениями ускоряющихся транспортных средств по отношению к неускоряющимся точкам опоры на основе электронно-контролируемых двигателей EmDrive и, соответственно, малыми приращениями скорости и энергии, что позволяет использовать микроэлектромеханические микромощные актуаторы для перемещения транспортных средств относительно упомянутых точек опоры.

Оценки энергетической эффективности механических устройств, обеспечивающих перемещение транспортных средств по отношению к неускоряющимся точкам опоры достаточно просты. Прейдя в систему отсчета, связанную с одним из неускоряющихся двигателей, и, разделив импульс, приобретаемый вследствие работы одного двигателя за время его работы во включенном состоянии, на соответствующую кинетическую энергию, приобретаемым транспортным средством за указанное время, несложно показать, что энергетическая эффективность устройств, выполняющих механическую работу в подобных двигательных системах обратно пропорциональна скорости транспортного средства, приобретаемой им за указанное время [16]. Так как скорость, приобретаемая транс-

портным средством относительно неускоряющегося двигателя EmDrive, пропорциональна времени работы двигателя во включенном состоянии, энергетическая эффективность устройств, выполняющих механическую работу в рассматриваемых двигательных системах обратно пропорциональна времени работы двигателей EmDrive во включенном состоянии, то есть при высокой частоте переключения двигателей EmDrive может быть значительно выше энергетической эффективности двигателей EmDrive [16]. Рассмотренное свойство встроенных точек опоры на лазерных двигателях EmDrive напоминает эффект Оберта [6]. Поскольку скорости включенных лазерных микродвигателей EmDrive при высокой частоте переключения практически совпадают со скоростью транспортных средств, можно считать, что рассматриваемая двигательная система позволяет реализовать практически идеальный вариант упомянутого эффекта.

Массивы небольших модулей, содержащих микрооптоэлектронные лазерные двигатели EmDrive и микромощные микроэлектронные электромеханические системы (MEMS), могут быть использованы для создания мощных двигательных систем, работающих с высокой энергетической эффективностью.

На Рисунке 2 представлен эскиз футуристического космического корабля с массивом циклически работающих лазерных микродвигателей EmDrive, используемых в качестве точек опоры.

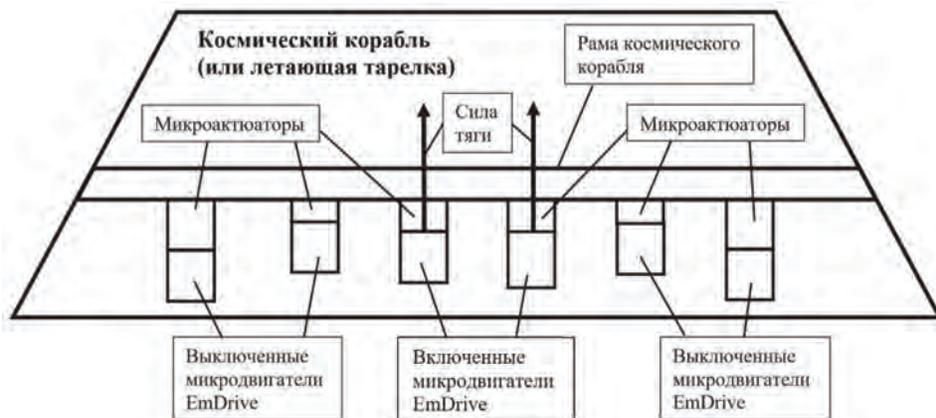


Рисунок 2. Эскиз футуристического космического корабля с массивом циклически работающих лазерных микродвигателей EmDrive, используемых в качестве точек опоры

Двигательная система космического корабля, схематично показанного на Рисунке 2, работает следующим образом. Микродвигатели EmDrive работают циклически, они включаются и выключаются. Включенные микродвигатели EmDrive создают силу тяги. Космический корабль отталкивается от включенных микродвигателей EmDrive при помощи актюаторов с силой, уравнивающей силу их тяги, что исключает ускорение указанных двигателей и поддерживает их высокую силу тяги. Далее включенные двигатели выключаются, перемещаются вперед, включаются, и процесс повторяется. Циклическая работа микродвигателей EmDrive обеспечивает непрерывное ускорение космического корабля. Так как быстродействие лазеров очень высокое, подобная система может работать с очень небольшими приращениями скорости, и для ускорения космического корабля по отношению к включенным микродвигателям EmDrive могут использоваться микроэлек-

трехмеханические системы (MEMS). В простейшем случае это могут быть пьезоэлектрические актюаторы.

Заключение

Предложена концепция полностью твердотельного лазерного двигателя EmDrive в виде VCSEL-структуры (VCSEL-EmDrive-двигателя). Показано, что энергетическая эффективность VCSEL-EmDrive-двигателя не зависит от длины резонатора, и, соответственно, лазерный двигатель EmDrive может быть достаточно коротким. Приведена численная оценка, показывающая, что энергетическая эффективность VCSEL-EmDrive-двигателей, работающих практически без рабочего тела (так как масса энергии, действующей как рабочее тело, незначительна), теоретически может быть сравнима с энергетической эффективностью реактивного двигателя и автомобильного двигателя внутреннего сгорания при ускорении автомобиля. Высокая частота переключения лазеров позволяет создавать микроэлектронные транспортные системы, содержащие VCSEL-EmDrive-двигатели, используемые в качестве встроенных электронно-управляемых точек опоры для ускоряющихся транспортных средств, и MEMS-актюаторы, используемые для ускорения транспортных средств по отношению к равномерно движущимся во включенном состоянии указанным точкам опоры. Показано, что в отличие от энергетической эффективности автомобильного двигателя внутреннего сгорания сила тяги микроэлектронной двигательной системы при незначительных релятивистских эффектах не зависит от скорости транспортного средства. Подобная двигательная установка перспективна для использования в различных футуристических транспортных средствах. Приведен эскиз футуристического космического корабля с микроэлектронной двигательной системой со встроенными точками опоры основе VCSEL-EmDrive-двигателей.

Литература

1. Зубков В.И. Использование двигателей EmDrive в качестве точек опоры для ускоряющихся транспортных средств: труды 63-й конференции МФТИ. Секция «Аэрокосмические технологии» [Электронный ресурс]. 2020. С. 186–188. URL: <https://mipt.ru/science/Stop100/education/courseproposal/%D0%A4%D0%90%D0%9A%D0%A2%20%D1%84%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BB.pdf> (дата обращения 23.08.2021).
2. Нива (автомобиль) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%B2%D0%B0_\(%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%B2%D0%B0_(%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C)) (дата обращения 23.01.2022).
3. Трансмиссия [Электронный ресурс]. URL: <https://lada-niva.ru/niva/9.html> (дата обращения 23.01.2022).
4. Bragg Mirrors. Available at: https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html (date of the application: 23.02.2022).
5. Kenichi Iga (2008). Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, No. 1, pp. 1–10. Available at: https://www.researchgate.net/publication/243747546_Vertical-Cavity_Surface-Emitting_Laser_Its_Conception_and_Evolution (date of the application: 23.01.2022).
6. Oberth effect. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Oberth_effect (date of the application: 23.08.2021).

7. Princeton optronics. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology. Available at: <https://www.newmetals.co.jp/pdf/234.pdf> (date of the application: 18.08.2021).
8. Q factor. Available at: https://www.rp-photonics.com/q_factor.html (date of the application: 19.08.2021).
9. *Shawyer R.* (2018) EmDrive Propulsion. Technical University Dresden. Available at: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (date of the application: 19.09.2020).
10. *Shawyer R.* The dynamic operation of a high Q EmDrive microwave thruster. SPR Ltd UK. Available at: <http://www.emdrive.com/IAC13paper17254.v2.pdf> (date of the application: 22.09.2020).
11. *Sheng Hang, Yonghui Zhang, Yuanbin Gao* (2020) On the origin for the hole confinement into apertures for GaN-based VCSELs with buried dielectric insulators. Optics Express, vol. 28, Is. 6, pp. 8668–8679. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-6-8668&id=428930> (date of the application: 23.02.2022).
12. Spacecraft propulsion. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_propulsion (date of the application: 10.08.2021).
13. Supermirrors. Available at: <https://www.rp-photonics.com/supermirrors.html> (date of the application: 10.08.2021).
14. Vertical External-cavity Surface-emitting Lasers. Available at: https://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html (date of the application: 23.08.2021).
15. *Zubkov V.* (2021) Outlook for development of the propulsion systems with built-in EmDrive engine-based support points. Tenth international aerospace congress IAC, p. 71.
16. *Zubkov V.* Energy efficiency of speeding up vehicles with built-in switchable EmDrive engine-based support points. Available at: https://www.academia.edu/49063429/Energy_efficiency_of_speeding_up_vehicles_with_built_in_switchable_EmDrive_engine_based_support_points (date of the application: 02.12.2021).
17. *Zubkov V.* Simple optical EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48911673/Simple_optical_EmDrive_engin (date of the application: 19.02.2021).

References

1. *Zubkov V.I.* (2020) *Ispol'zovanie dvigatelej EmDrive v kachestve toчек опоры dlya uskoryayushchihsya transportnyh sredstv: Trudy 63 konferencii MFTI, sekciya «Aerokosmicheskietekhnologii»* [Using EmDrive engines as fulcrum for accelerating vehicles: Proc. of the 63rd MIPT Conference. Section “Aerospace technologies”], pp. 186–188. Available at: <https://mipt.ru/science/Stop100/education/courseproposal/%D0%A4%D0%90%D0%9A%D0%A2%20%D1%84%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BB.pdf> (date of the application: 23.08.2021) (in Russian).
2. Niva (avtomobil'). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%B2%D0%B0_\(%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B8%D0%B2%D0%B0_(%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C)) (date of the application: 23.01.2022) (in Russian).
3. *Transmissiya* [Transmission]. Available at: <https://lada-niva.ru/niva/9.html> (date of the application: 23.01.2022) (in Russian).
4. Bragg Mirrors. Available at: https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html (date of the application: 23.02.2022).
5. Kenichi Iga (2008). Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, No. 1, pp. 1–10. Available at: https://www.researchgate.net/publication/243747546_Vertical-Cavity_Surface-Emitting_Laser_Its_Conception_and_Evolution (date of the application: 23.01.2022).

6. Oberth effect. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Oberth_effect (date of the application: 23.08.2021).
7. Princeton optronics. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology. Available at: <https://www.newmetals.co.jp/pdf/234.pdf> (date of the application: 18.08.2021).
8. Q factor. Available at: https://www.rp-photonics.com/q_factor.html (date of the application: 19.08.2021).
9. Sawyer R. (2018) EmDrive Propulsion. Technical University Dresden. Available at: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (date of the application: 19.09.2020).
10. Sawyer R. The dynamic operation of a high Q EmDrive microwave thruster. SPR Ltd UK. Available at: <http://www.emdrive.com/IAC13paper17254.v2.pdf> (date of the application: 22.09.2020).
11. Sheng Hang, Yonghui Zhang, Yuanbin Gao (2020) On the origin for the hole confinement into apertures for GaN-based VCSELs with buried dielectric insulators. Optics Express, vol. 28, Is. 6, pp. 8668–8679. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-6-8668&id=428930> (date of the application: 23.02.2022).
12. Spacecraft propulsion. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_propulsion (date of the application: 10.08.2021).
13. Supermirrors. Available at: <https://www.rp-photonics.com/supermirrors.html> (date of the application: 10.08.2021).
14. Vertical External-cavity Surface-emitting Lasers. Available at: https://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html (date of the application: 23.08.2021).
15. Zubkov V. (2021) Outlook for development of the propulsion systems with built-in EmDrive engine-based support points. Tenth international aerospace congress IAC, p. 71.
16. Zubkov V. Energy efficiency of speeding up vehicles with built-in switchable EmDrive engine-based support points. Available at: https://www.academia.edu/49063429/Energy_efficiency_of_speeding_up_vehicles_with_built_in_switchable_EmDrive_engine_based_support_points (date of the application: 02.12.2021).
17. Zubkov V. Simple optical EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48911673/Simple_optical_EmDrive_engin (date of the application: 19.02.2021).