

УДК 535.417.26

© Н. А. Грязнов, Д. А. Горячкин, В. И. Купренюк, Е. Н. Соснов, В. Л. Алексеев, 2020

## УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕФРАКТИВНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАЙКЕЛЬСОНА

В ряде применений интерферометра Майкельсона (ИМ), в частности при его использовании в лазерном резонаторе, необходима высокая стабильность фазовых характеристик. В настоящей работе проведено экспериментальное сравнение двух конфигураций интерферометров, один из которых построен по классической схеме, а второй — по рефрактивной схеме, имеющей повышенную устойчивость к разъюстировкам и случайным флуктуациям параметров окружающей среды. Обсуждается возможность применения управляемого рефрактивного ИМ в схеме лазерного резонатора для генерации ультракоротких лазерных импульсов.

*Кл. сл.:* интерферометр Майкельсона (ИМ), рефрактивный интерферометр Майкельсона (РИМ), разность оптических длин плеч (РОДП), стабилизация, случайные и систематические флуктуации интенсивности излучения

### ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры Майкельсона (ИМ) являются устройствами, широко используемыми для количественного фазового анализа, для регистрации малых разностей оптических длин плеч (РОДП) и управления ими с точностью до долей длин волн светового излучения. Высокая чувствительность приборов имеет и свои отрицательные стороны. Так, случайные изменения давления и температуры воздуха способны вызывать изменения в показателях преломления в плечах ИМ, причем даже очень малые флуктуации температуры, движение воздуха, механические колебания конструкции могут приводить к смещениям, вносящим заметные случайные и систематические ошибки в результаты измерений.

Пассивная стабилизация ИМ, предназначенного для работы в составе лазерного излучателя ультракоротких импульсов, экспериментально продемонстрирована нами в работе [1]. В настоящей работе мы исследовали возможность дальнейшего повышения стабильности лазерного резонатора с управляемым ИМ, описанного в [2], путем применения оригинальной схемы интерферометра, содержащего рефрактивные и зеркальные оптические элементы, называемого далее рефрактивным интерферометром Майкельсона (РИМ), идея которой была предложена в патенте [3].

Судя по литературе, данная схема интерферометра за последнее десятилетие не нашла широкого практического применения. Возможно, причина этого состоит в сложности нанесения составных оптических покрытий требуемой конфигурации,

однако в случае резонатора, управляемого ИМ [2], использование рефрактивной схемной конфигурации, обладающей повышенной стабильностью, может оказаться оправданным и целесообразным.

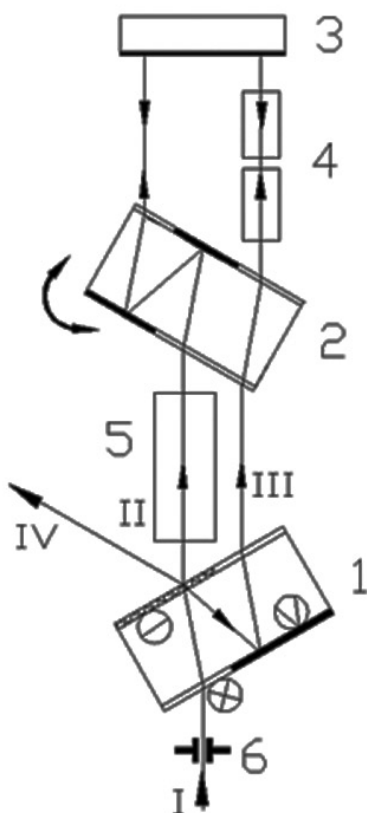
Ниже описаны экспериментальные результаты по исследованию РИМ оригинальной конструкции, включенного в состав лазерного излучателя [2]. Проведено его сравнение с классическим ИМ, описанным в нашей работе [1], и анализ факторов, вызывающих возможные нарушения стабильности выходной мощности лазера.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Оптическая схема РИМ (см. также [3]), разработанная и исследуемая в рамках настоящей работы, показана на рис. 1. Его конструктивная реализация иллюстрируется фотографией в Приложении на рис. П1.

Схема состоит из основного 1 и компенсирующего 2 светоделителей и единого глухого концевое зеркала 3. Все элементы изготовлены из оптического стекла К8 с соответствующими диэлектрическими покрытиями. Зеркало является полностью отражающим, светоделители имеют сложные составные оптические покрытия. На рис. 1 области с полностью отражающими покрытиями ( $R = 99.5\%$ ) условно обозначены черными линиями, область со светоделительным покрытием ( $R = 50\%$ ) заштрихована, а области с просветляющими покрытиями свободны от штриховки.

Пластины 1 и 2 выбираются плоскопараллельными с одинаковой толщиной и устанавливаются под одинаковыми углами падения



**Рис. 1.** Оптическая схема РИМ.

1, 2 — светоделители; 3 — зеркало; 4 — кристаллы ЭОМ; 5 — компенсатор; 6 — диафрагма

к входному лучу I (см. рис. 1), составляющими в данном случае  $30^\circ$ . Положение светоделителя 1 фиксировано, пластина 2 может поворачиваться на небольшие углы (порядка единиц градусов), как показано по стрелке, обозначенной на рисунке. Концевое полностью отражающее зеркало 3 устанавливается перпендикулярно направлению входного луча и в этом положении фиксируется. Диафрагма диаметром 2.5 мм используется в составе лазерного резонатора, кроме того, ее наличие удобно с точки зрения фиксации точки входа луча I в РИМ.

Входной пучок I на задней грани светоделителя 1 делится пополам на два луча II и III (два плеча ИМ), причем, как видно из рис. 1, при равенстве углов падения количество и длина проходов по воздуху и внутри пластин в обоих плечах одни и те же, поэтому и оптические длины плеч автоматически оказываются одинаковыми. Пучки после прохода через плоскопараллельные пластины 1 и 2 всегда перпендикулярны отражающей поверхности общего заднего зеркала 3, а возможные незначительные различия в толщине и клиновидности пластин могут быть скомпенсированы малым

разворотом пластины 2. При таком развороте оптические длины путей в разных плечах ИМ изменяются по-разному. Поскольку оба пучка проходят через одни и те же среды, следует ожидать повышения стабильности выходного пучка IV по отношению к случайным тепловым и турбулентным флуктуациям внешней среды.

Кроме этого, поворотом пластины 2 по стрелке, показанной на рисунке, можно вводить заданную разность оптических длин плеч (РОДП) интерферометра. Для этого в конструкции пластина 2 устанавливается на поворотный столик. Таким образом, исключается необходимость включать в одно из плеч ИМ субмикронный линейный пьезотранслятор, что также повышает устойчивость ИМ к случайным ошибкам и флуктуациям.

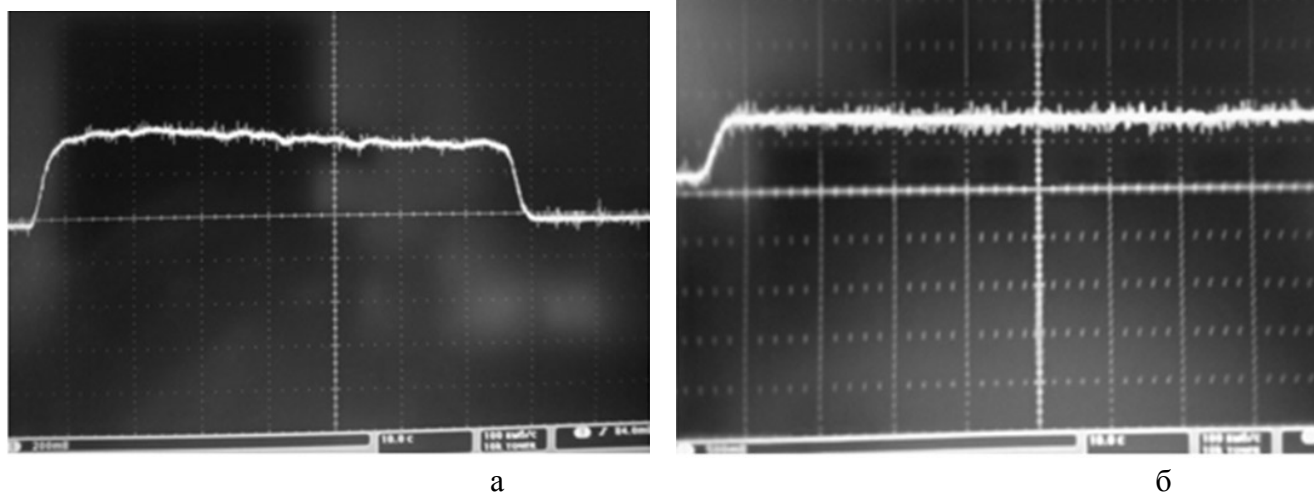
Нелинейные кристаллы ЭОМ (поз. 4 на рис. 1) при использовании РИМ в управляемом режиме для генерации УКИ могут быть введены в одно из плеч. При этом во второе плечо устанавливается стеклянный компенсатор 5 с соответствующей оптической длиной. Отметим, что в экспериментах по стабилизации, описываемых в настоящей работе, элементы 4 и 5 отсутствовали.

Пластины 1 и 2 с составными оптическими покрытиями были изготовлены на базе стандартных эталонных пластин ПМ15 по нашему заказу в ООО "ОптоТЛ", Санкт-Петербург. Результаты их испытаний в РИМ, установленном в составе излучателя, описанного нами в работе [2], рассматриваются в следующем разделе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты, так же как и в работе [1], проводились на базе компактной геометрии резонатора, когда длинная (1.5 м) эквивалентная схема с помощью зеркальных ретроотражателей была "свернута" в блок с длиной, не превышающей 350 мм. Внешний вид излучателя с конфигурацией традиционного ИМ (подробнее см. [2]) приведен в Приложении на рис. П2. В нижней части рисунка показан РИМ, который теперь вводился в резонатор в качестве составного выходного зеркала взамен обычного ИМ таким образом, чтобы положения концевых зеркал, объединенных на рис. П2 стрелкой, в точности совпадали. Положения остальных элементов излучателя не изменялись.

Оптическая схема измерений, за исключением замены интерферометров, совпадает со схемой, используемой в работе [1], и далее не описывается. Юстировка резонатора с РИМ сводится к установке заднего концевой зеркала 3 (см. рис. 1) строго назад по оси резонатора, остальные элементы РИМ на точность юстировки не влияют. На выходе резонатора всегда наблюдается нулевое поле интерференционной картины, интенсивность



**Рис. 2.** Стабильность уровня мощности излучения для обычного ИМ (а) и для РИМ (б).  
Развертка 10 с/дел.

которого от максимума до минимума изменяется при малом развороте пластины 2 (см. рис. 1).

Распределение интенсивности в пятне выходного излучения было близким к гауссовому, уровень выходной мощности при настройке на максимальную интенсивность нулевого поля, как правило, составлял 0.2–0.3 Вт, что примерно вдвое уступало уровню мощности, достигаемому в [1] с использованием классического ИМ. Это могло объясняться либо увеличением активных потерь резонатора за счет увеличения числа отражений от составных оптических покрытий, либо тем фактом, что во время проведения данной серии экспериментов было отмечено некоторое уменьшение эффективности квантрона по сравнению с [1].

Долговременная стабильность РИМ была высокой и не требовала его размещения в дополнительном корпусе. Каких-либо быстрых и медленных колебаний интенсивности за время наблюдений до нескольких минут отмечено не было. На рис. 2, а, показан пример осциллограммы изменения выходной мощности для обычного ИМ из работы [1]; осциллограмма на рис. 2, б, соответствует РИМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что в настоящей работе разработан и протестирован оригинальный стабильный интерферометр Майкельсона рефрактивного типа, идея которого предложена в патенте [3]. Экспериментально продемонстрирована повышенная стабильность рефрактивного интерферометра, который имеет следующие преимущества перед традиционным:

- простота и надежность юстировки, отсутствие необходимости угловой подстройки элементов;
- возможность точного выравнивания РОДП без пьезо-транслятора, который является элементом, чувствительным по отношению к случайным акустическим шумам;
- снижение чувствительности по отношению к микроскопическим поступательным перемещениям элементов и к колебаниям окружающего воздуха, поскольку траектории пучков в обоих плечах одинаковы.

Экспериментальная апробация РИМ в пассивном режиме позволяет рассчитывать на получение воспроизводимых и стабильных результатов и в управляемом режиме в качестве составного зеркала резонатора твердотельного лазера, излучающего ультракороткие импульсы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. П1. Конструкция РИМ

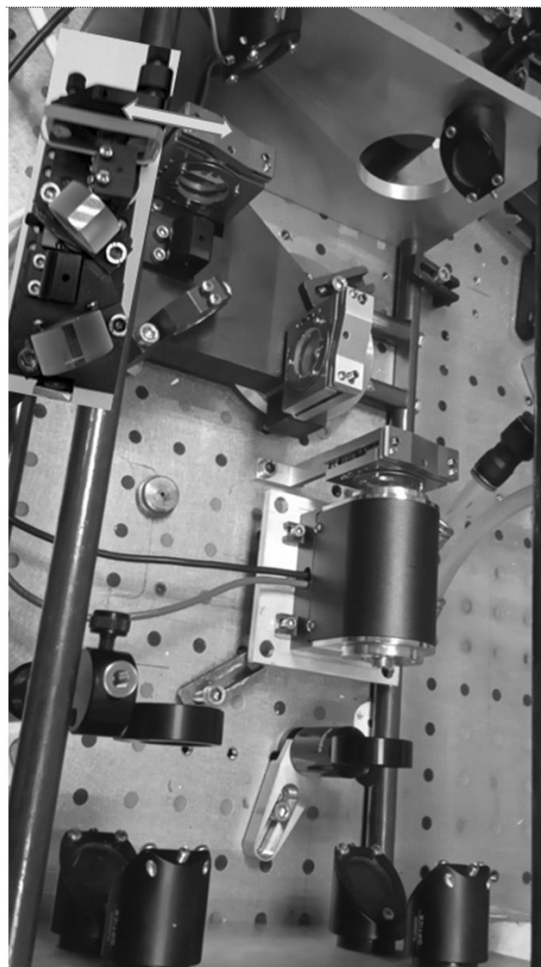


Рис. П2. Фотография излучателя, иллюстрирующая замену классического ИМ на рефрактивный

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания 2019 г. № 075-00924-19-00 от 28.12.18.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов Н.А., Горячкин Д.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н., Алексеев В.Л. Пассивная стабилизация интерферометра Майкельсона // Научное приборостроение. 2020. Т. 20, № 4. С. 63–74.  
URL: <http://iairas.ru/mag/2020/abst4.php#abst7>
2. Грязнов Н.А., Соснов Е.Н., Горячкин Д.А., Никитина В.М., Родионов А.Ю. Активная фазовая синхронизация мод в резонаторе с управляемым интерферометром Майкельсона // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 4. С. 3–10.

3. Messerschmidt R.G., Abbink R.E. Interferometer spectrometer with reduced alignment sensitivity. Patent US 7,161,679 B2. 2007.  
URL: <https://patents.google.com/patent/US7161679B2/en>

**Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт Петербург**

Контакты: Горячкин Дмитрий Алексеевич,  
d.goryachkin@rtc.ru

Материал поступил в редакцию 08.12.2020

## CONTROLLABLE MICHELSON INTERFEROMETER OF REFRACTIVE TYPE

**N. A. Gryaznov, D. A. Goryachkin, V. I. Kuprenyuk, E. N. Sosnov, V. L. Alekseev**

*The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg*

In some applications of a Michelson interferometer, in particular, when it is used in a laser resonator, the high stability of its phases is necessary. The proposed paper contains the comparison of two interferometer configurations. The first of them uses a classical schematic interferometer, the second one is designed with the use of a refractive schematic one, which is typical of enhanced stability against misalignments and occasional fluctuations of surrounding air. The possibility is discussed of applying the controllable refractive interferometer inside the resonator for generation of ultra short laser pulses.

*Keywords:* Michelson interferometer (MI), refractive Michelson interferometer (RMI), the optical paths difference (OPD), long-term stability

### INTRODUCTION

Michelson interferometers (MIs) are devices widely used for quantitative phase analysis, for recording small the optical paths differences (OPD) and control them accurate to fractions of the wavelengths of light radiation. The high sensitivity of the devices also has its negative sides. Thus, random changes in air pressure and temperature can cause changes in the refractive indices in the arms of the MI, and even very small temperature fluctuations, air movement, mechanical vibrations of the structure can lead to displacements that introduce noticeable random and systematic errors in the measurement results.

Passive stabilization of the MI, intended for operation as a part of a laser emitter of ultrashort pulses, was experimentally demonstrated by us in [1]. In this work, we investigate the possibility of further increasing the stability of a laser resonator with a controlled MI, described in [2], by using an original interferometer scheme containing refractive and mirror optical elements, hereinafter called the Michelson refractive interferometer (RMI), the idea of which was proposed in patent [3].

Judging by the literature, this interferometer scheme has not found wide practical application over the past decade. Perhaps the reason for this lies in the complexity of applying composite optical coatings of the required configuration, but in the case of a resonator controlled by an MI [2], the use of a refractive circuit configuration with increased stability may be justified and expedient.

Below are described the experimental results on the study of the RMI of the original design, included in the laser emitter [2]. It was compared with the classical MI described in our work [1], and the factors causing possible disturbances in the stability of the laser output power were analyzed.

### EXPERIMENTAL EQUIPMENT

The optical scheme of the RMI (see also [3]), developed and studied in the framework of this work, is shown in Fig. 1. Its constructive implementation is illustrated by a photograph in the Appendix in Fig. III.

The circuit consists of the main 1 and compensating 2 beamsplitters and a single 100 % end mirror 3. All elements are made of optical glass K8 with appropriate dielectric coatings. The mirror is fully reflective, and the beam splitters have complex composite optical coatings. In Fig. 1, the areas with fully reflective coatings ( $R = 99.5\%$ ) are conventionally marked with black lines, the area with a beam-splitting coating ( $R = 50\%$ ) is shaded, and the areas with antireflection coatings are free of shading.

Plates 1 and 2 are parallel with the same thickness and installed at the same angles of incidence to the input ray I (see Fig. 1), constituting in this case, 30 degrees. The position of the beam splitter 1 is fixed, the plate 2 can be rotated through small angles (of the order of several degrees), as shown by the arrow indicated on the image. The end fully reflecting mirror 3 is installed perpendicular to the direction of the input beam and is fixed in this position. A diaphragm with a diameter of 2.5 mm is used as part of a laser resonator; in addition, its presence is convenient in terms of fixing the entry point of beam I into the RMI.

The input beam I on the rear face of the beam splitter 1 is divided in half into two beams II and III (two arms of the MI), and, as can be seen in Fig. 1, if the angles of incidence are equal, the number and length of passes through the air and inside the plates in both arms are the same, therefore, the optical lengths of the arms are automatically the same. Beams after passing through plane-parallel plates 1 and 2 are always perpendicular to the reflecting surface of the single

**Fig. 1.** Optical layout of RMI.

1, 2 — beam splitters; 3 — mirror; 4 — EOM crystals;  
5 — compensator; 6 — diaphragm

end mirror 3, and possible slight differences in the thickness and wedge shape of the plates can be compensated for by a small turn of the plate 2. With such a turn, the optical path lengths in different arms of the MI change in different ways. Since both beams pass through the same media, an increase in the stability of the output beam IV with respect to random thermal and turbulent fluctuations of the external medium should be expected.

In addition, by turning plate 2 in the direction of the arrow shown in the figure, it is possible to enter the specified optical paths difference (OPD) of the interferometer. For this plate 2 is installed on a turntable. This eliminates the need to include a sub-micron linear piezotransmitter in one of the MI arms, which also increases the MI stability to random errors and fluctuations.

Nonlinear EOM crystals (pos. 4 in Fig. 1) can be introduced into one of the arms when using RMI in a controlled mode to generate ultrashort pulses. In this case, a glass compensator 5 with a corresponding optical length is installed in the second arm. Note that in the stabilization experiments described in this work, elements 4 and 5 were absent.

Plates 1 and 2 with composite optical coatings were made on the basis of standard ПМ15 reference plates according to our order in OptoTL Ltd, St. Petersburg. The results of their tests in the RMI, installed in the emitter described by us in [2], are considered in the next section.

## EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments, as in [1], were carried out on the basis of the compact geometry of the resonator, when a long (1.5 m) equivalent circuit with the help of mir-

ror retroreflectors was "folded" into a block with a length not exceeding 350 mm. The external view of the emitter with the configuration of the traditional MI (for more details, see [2]) is shown in the Appendix in the Fig. П2. In the lower part of the figure, the RMI is shown, which was now introduced into the resonator as a composite output mirror instead of the conventional MI so that the positions of the end mirrors, combined by arrow in the Fig. П2, exactly match. The positions of the other elements of the emitter did not change.

The optical scheme of measurements, except for the replacement of interferometers, coincides with the scheme used in [1] and is not described further. The alignment of the resonator with RMI is reduced to the installation of the end mirror 3 (see Fig. 1) strictly backward along the axis of the resonator; the rest of the RMI elements do not affect the alignment accuracy. At the exit of the resonator, a zero field of the interference pattern is always observed, the intensity of which changes from maximum to minimum at a small turn of plate 2 (see Fig. 1).

The intensity distribution in the output spot was close to Gaussian; the output power level when tuned to the maximum zero field intensity was, as a rule, 0.2–0.3 W, which was approximately two times lower than the power level achieved in [1] using the classical MI. This could be explained either by an increase in the active losses of the resonator due to an increase in the number of reflections from composite optical coatings, or by the fact that during this series of experiments, a slight decrease in the efficiency of the laser head was noted in comparison with [1].

The long-term stability of the RMI was high and did not require its placement in an additional housing. No fast or slow fluctuations in the intensity were noted over the observation time of up to several minutes. In Fig. 2, a, an example of an oscillogram of changes in output power for a conventional MI from work [1] is shown; oscillogram in Fig. 2, b, corresponds to RMI.

**Fig. 2.** Stability of the radiation power level for conventional MI (a) and for RMI (б).  
Sweep 10 sec / div

## CONCLUSION

In conclusion, we note that in this work we describe developed and tested an original stable Michelson interferometer of the refractive type, the idea of which was proposed in the patent [3]. The increased stability of the refractive interferometer has been experimentally demonstrated. The device has the following advantages over the traditional one:

- simplicity and reliability of adjustment, no need for angular adjustment of elements;
- the possibility of accurate alignment of the OPD without a piezo-translator, which is an element sensitive to random acoustic noise;
- decreased sensitivity in relation to microscopic translational displacements of elements and to vibrations of the surrounding air, since the trajectories of the beams in both arms are the same.

Experimental testing of RMI in the passive mode makes it possible to count on obtaining reproducible and stable results in a controlled mode as a composite

mirror of the resonator of a solid-state laser emitting ultrashort pulses

## APPENDIX

**Fig. П1.** RMI design

**Fig. П2.** Photo of the emitter illustrating the replacement of the classical MI with the refractive one

*The work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment of 2019 No. 075-00924-19-00 dated 28.12.18.*

## REFERENCES

1. Gryaznov N.A., Goryachkin D.A., Kuprenyuk V.I., Sosnov E.N., Alekseev V.L. [Passive stabilisation of Michelson interferometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 63–74. DOI: 10.18358/np-30-4-i6374
2. Gryaznov N.A., Sosnov E.N., Goryachkin D.A., Nikitina V.M., Rodionov A.Yu. [Active phase synchronization of modes in a resonator with a Michelson interferometer]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical magazine], 2019, vol. 86, no. 4, pp. 3–10.
3. Messerschmidt R.G., Abbink R.E. *Interferometer spectrometer with reduced alignment sensitivity*. Patent US 7,161,679 B2. 2007.  
URL: <https://patents.google.com/patent/US7161679B2/en>

Contacts: *Goryachkin Dmitry Alekseevich*,  
d.goryachkin@rtc.ru

Article received by the editorial office on 08.12.2020