

В годы войны он занимался разработкой радионавигационных и радиолокационных систем для военной авиации.

В 1951 г. В.В. Мигулин назначается директором Сухумского физико-технического института, в котором ведутся работы по атомному проекту, в том числе связанные с созданием ракет. В этом институте работало много немецких учёных, вывезенных из Германии.

Здесь я сделаю небольшое отступление. Многие, наверное, знают немецкого учёного Клауса Тиссена. В 1953–1954 гг. он являлся студентом Московского государственного университета. Я тогда был студентом Физико-технического института, и мы с ним были знакомы. Так вот, его отец Петер Адольф Тиссен — это тот, кто создал топливо для немецкой ракеты ФАУ-2. После войны американцы, как вы знаете, захватили конструктора ракет фон Брауна, а мы, значит, — П.А. Тиссена, бывшего советника Гитлера по науке. И этот самый П.А. Тиссен, будучи, по сути дела, техническим директором Сухумского института, теперь работал на Сталина.

С 1957 г. по 1959 г. В.В. Мигулин исполнял обязанности заместителя Генерального директора МАГАТЭ в Вене.

В 1962–1969 гг. В.В. Мигулин возглавлял отдел параметрических приборов в Институте радиотехники и электроники АН СССР. Он был, по-видимому, первым, кто в 1968 г. привлек внимание к использованию скивдов, которые тогда появились, в качестве квантовых интерференционных датчиков магнитного поля. И первые скивды у нас были сделаны под его руководством в этом отделе. Он создал команду специалистов, которых многие знают: В.П. Кошелец, Г.А. Овсянников и др. Это всё его школа. И сегодня, во многом благодаря В.В. Мигулину и созданной им школе, ИРЭ РАН в области разработки скивдов и их применения находится в первых рядах. Часть моего последующего доклада по биомангнитным измерениям как раз будет посвящена использованию скивдов, которые имеют чрезвычайно высокую чувствительность.

В 1969 г. В.В. Мигулин становится директором Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР (ИЗМИРАН) и возглавляет этот институт в течение 20 лет. В.В. Мигулин внёс большой вклад в развитие новой области науки — солнечно-земной физики. Он также являлся научным руководителем программы "Интеркосмос-19". И первые результаты по исследованию космоса, которыми мы гордимся, тоже были получены фактически под его руководством.

В.В. Мигулин имел чрезвычайно широкие научные интересы. Я даже помню, хотя подробно развить эту тему не могу, что он как-то рассказывал, что они вместе с Зельдовичем даже кварки где-то обнаружили. Кроме того, Владимир Васильевич постоянно вёл большую общественную работу. В течение почти 30 лет он являлся заместителем академика-секретаря Отделения физических наук АН. И в общем, фактически вместе с академиком-секретарём руководил Отделением.

В.В. Мигулин участвовал также в международных организациях. Есть такая организация — Международный научный радиосоюз (URSI — от франц. Union Radio-Scientifique Internationale). Несмотря на то что существует много международных организаций в обла-

сти радиофизики, радиоэлектроники и т.д., большинство из них являются прикладными. Например, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) — это всё-таки институт именно инженеров в области радиоэлектроники и электротехники, и он имеет в основном практическую направленность. URSI — это, по существу, единственная организация, которая занимается фундаментальными проблемами. Так вот, Мигулин пять лет был вице-президентом всего URSI и в течение 20 лет возглавлял Российский комитет URSI. Сейчас, по сути, я являюсь его правопреемником, поскольку возглавляю этот же комитет URSI. Так что я очень хорошо знаю его деятельность и в международном масштабе.

Это была исключительно яркая личность. И вот что было характерно для Владимира Васильевича — он был очень обязательным человеком и настоящим трудолюбом и всегда очень переживал, если куда-нибудь опаздывал — у него всё было расписано по минутам. И это было не только по отношению к работе, но и по отношению к людям тоже. Когда Владимир Васильевич с вами говорил, он вас слушал и смотрел в глаза, и старался что-то всегда сделать — помочь. Даже когда он уже не работал в ИРЭ, после 1988 г., когда я стал директором ИРЭ, он постоянно приходил, интересовался работой отдела сверхпроводниковой электроники, который, по сути, был его детищем, и был всё время к нему близок.

Самая светлая память у нас о нём осталась, так же как и у всех, я думаю, кто его знал. Это был замечательный человек.

PACS numbers: 04.80.Nn, 07.60. – j, 42.60. – v
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203g.0324

Параметрическая колебательная неустойчивость в лазерных гравитационных антеннах

С.П. Вятчанин

1. Введение

Мне выпала честь знать Владимира Васильевича Мигулина, будучи студентом, аспирантом, а затем сотрудником на возглавляемой им кафедре. К сожалению, у меня не было тесного контакта с ним, но я хорошо знаю, насколько высок был его авторитет на кафедре.

В.В. Мигулин известен работами по параметрическим процессам [1–3]. Тема моего доклада — нежелательный эффект параметрической неустойчивости, также имеющий параметрическую природу.

Наглядной иллюстрацией для описания параметрической колебательной неустойчивости является модель двухконтурного параметрического усилителя (рис. 1), состоящего из двух параллельных колебательных контуров, соединённых переменной ёмкостью связи $C_0(t) = C_0 + \delta C \cos \omega_0 t$ [4]. Хорошо известно, что при достаточной большой накачке (т.е. при достаточно большой модуляционной части ёмкости связи δC) работа параметрического усилителя становится неустойчивой. Усло-

С.П. Вятчанин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
E-mail: svyatchanin@phys.msu.ru

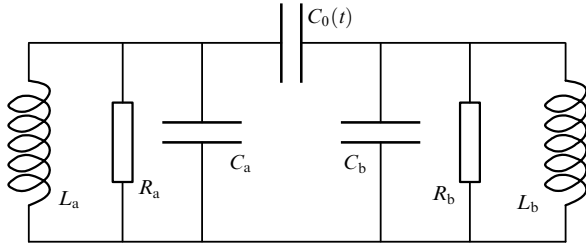


Рис. 1. Модель двухконтурного параметрического усилителя. Парциальные частоты ω_a, ω_b контуров и частота модуляции ω_0 ёмкости связи $C_0(t) = C_0 + \delta C \cos \omega_0 t$ удовлетворяют соотношению $\omega_0 \simeq \omega_a + \omega_b$.

вие неустойчивости при полном синхронизме (т.е. при $\omega_0 = \omega_a + \omega_b$) выглядит следующим образом:

$$\frac{\delta C^2}{C_a C_b} > \frac{\gamma_a \gamma_b}{\omega_a \omega_b}, \quad \gamma_a \equiv \frac{R_a}{2L_a}, \quad \gamma_b \equiv \frac{R_b}{2L_b}. \quad (1)$$

Известно также, что параметрическая накачка приводит к внесению отрицательного затухания, а условие (1) фактически описывает ситуацию, в которой вносимое затухание становится больше собственного [5].

2. Параметрическая колебательная неустойчивость

Для качественного рассмотрения явления параметрической колебательной неустойчивости (ПКН) рассмотрим схему резонатора Фабри–Перо (рис. 2), который возбуждается резонансной накачкой на частоте ω_0 . Одно из зеркал резонатора является подвижным и представляет собой механический осциллятор частоты ω_m . Пусть в резонаторе существует стоксова оптическая мода с собственной частотой ω_1 , так что выполняется следующее условие:

$$\omega_0 \simeq \omega_1 + \omega_m. \quad (2)$$

В этом случае возможно параметрическое взаимодействие между указанными модами, которое может привести к появлению параметрической неустойчивости [6–

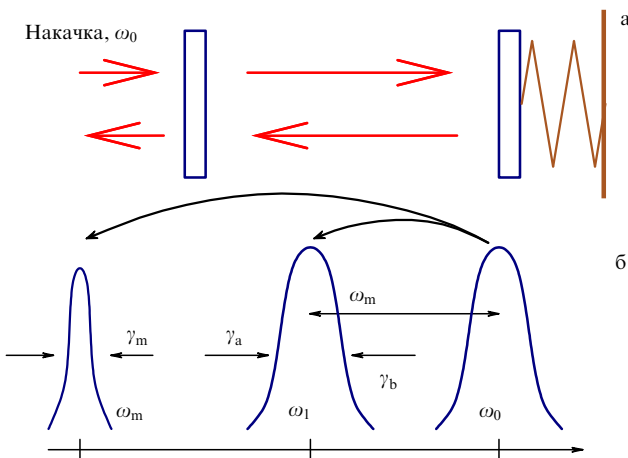


Рис. 2. (а) Схема резонатора Фабри–Перо, одно из зеркал которого является подвижным и представляет собой механический осциллятор на частоте ω_m . (б) Схема мод. Стрелками указаны потоки энергии в соответствии с соотношениями Мэнли–Роу.

10]. При наличии малых колебаний в стоксовой оптической моде возникает действующая на подвижное зеркало на разностной частоте $\omega_0 - \omega_1 \simeq \omega_m$ ponderomotorная сила, которая резонансно "раскачивает" механические колебания. С другой стороны, малые механические колебания зеркала вследствие эффекта Доплера приводят к появлению отражённых от зеркала волн с комбинационными частотами $\omega_0 \pm \omega_m$, одна из которых (на частоте $\omega_0 - \omega_m \simeq \omega_1$) резонансно возбуждает колебания в оптической стоксовой моде. Очевидно, что при увеличении мощности накачки на частоте ω_0 указанные механизмы будут приводить ко всё большей перекачке энергии. В соответствии с соотношениями Мэнли–Роу энергия от волны накачки будет передаваться оптической стоксовой и механической модам. Данный эффект может рассматриваться как внесение отрицательного затухания, поэтому при достижении некоторого порогового значения мощности накачки возникнет параметрическая неустойчивость.

ПКН является пороговым эффектом, условие его наступления удобно описывать фактором \mathcal{R} :

$$\mathcal{R} = \frac{W \omega_1}{c L m \omega_m \gamma_1 \gamma_m} \frac{\Lambda}{1 + (\Delta_1 / \gamma_1)^2} > 1, \quad (3)$$

$$\Delta_1 = \omega_0 - \omega_1 - \omega_m, \quad (4)$$

$$\Lambda = \frac{V_m \left| \int \mathcal{A}_{0in} \mathcal{A}_{1in}^* u_{\perp} d\mathbf{r}_{\perp} \right|^2}{\int |\mathcal{A}_{0in}(\mathbf{r}_{\perp})|^2 d\mathbf{r}_{\perp} \int |\mathcal{A}_{1in}(\mathbf{r}_{\perp})|^2 d\mathbf{r}_{\perp} \int |\mathbf{u}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}}, \quad (5)$$

где W — мощность, циркулирующая в основной моде Фабри–Перо-резонатора, γ_1 и γ_m — коэффициенты затухания стоксовой оптической и упругой мод, L — расстояние между зеркалами Фабри–Перо-резонатора, c — скорость света, m — масса зеркала, Δ_1 — величина расстройки, Λ — коэффициент перекрытия распределений основной, стоксовой оптических мод и упругой моды, $\mathcal{A}_0, \mathcal{A}_1$ — функции распределения светового поля по сечению пучка основной и стоксовой мод, u_{\perp} — перпендикулярная к поверхности зеркала компонента вектора смещения \mathbf{u} упругой моды, $d\mathbf{r}_{\perp}$ соответствует интегрированию по поверхности зеркала, а $d\mathbf{r}$ — интегрированию по объёму зеркала V_m .

При выполнении условия параметрической неустойчивости (3) и дальнейшем увеличении мощности лазера накачки W энергия \mathcal{E}_0 в основной моде на частоте ω_0 перестаёт увеличиваться, но начинают возрастать энергии в стоксовой и механической модах [11] (рис. 3). Это возрастание может привести к тому, что стоксова мода будет играть роль накачки для возбуждения следующей подходящей пары стоксовой и механической мод. Таким образом, возможно каскадное развитие параметрической неустойчивости.

Явление ПКН наблюдалось в оптических микрорезонаторах [12–14] при скромных мощностях оптической накачки, порядка 10^{-4} Вт, — это связано с высокими добротностями оптических мод (порядка 10^9) и малой эффективной массой механических колебаний (около 10^{-10} кг). Поэтому в таких микрорезонаторах относительно легко получить каскадную ПКН, что даёт возможность генерации оптических гребёнок [15–18].

Отметим, что в резонаторе может существовать и подходящая антистоксова оптическая мода с частотой $\omega_{1a} \simeq \omega_0 + \omega_m$. Тогда, в соответствии с соотношениями Мэнли–Роу, накачка будет вносить положительное

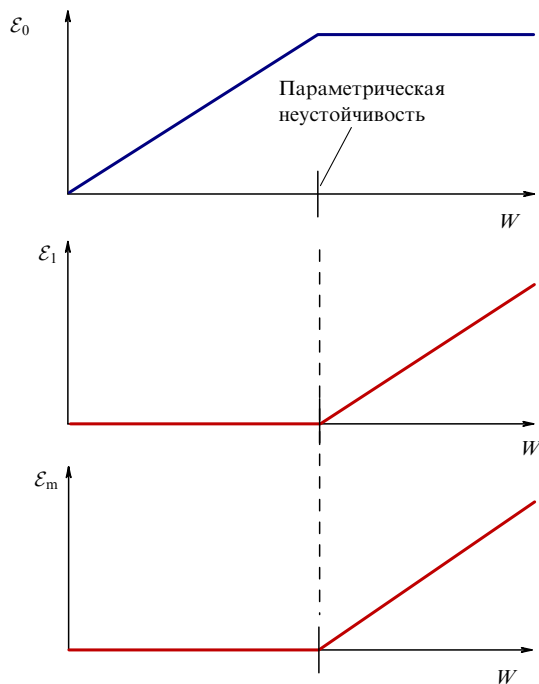


Рис. 3. Зависимости энергий ε_0 , ε_1 , ε_m в основной, стоксовой и механической модах соответственно от мощности накачки W для случаев ниже и выше порога параметрической неустойчивости.

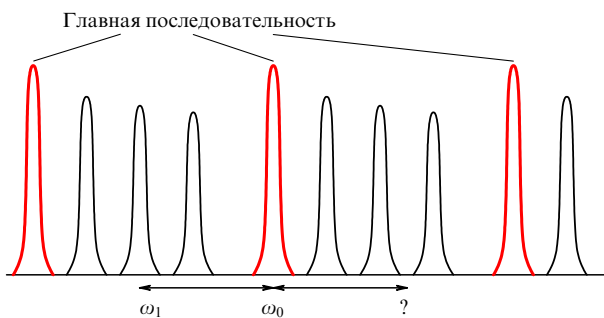


Рис. 4. Структура оптических мод Фабри–Перо-резонатора. Моды главной последовательности соответствуют высоким пикам. Стоксова оптическая мода имеет частоту ω_1 , возможная антистоксова мода обозначена знаком вопроса.

затухание в механическую моду, которое может быть больше отрицательного трения, вносимого стоксовой модой, и параметрическая неустойчивость станет невозможной [19]. При этом фотон волны накачки будет рассеиваться на упругом фоне, создавая фотон антистоксовой волны, а часть энергии будет забираться из упругой волны. Поэтому, с одной стороны, наличие стоксовой оптической моды приводит к внесению отрицательного затухания в механическую моду (и, следовательно, к эффекту параметрической неустойчивости), с другой — наличие антистоксовой моды вызывает затухание механической моды. Однако вероятность того, что антистоксова мода полностью подавит параметрическую неустойчивость, достаточно мала — это иллюстрирует рис. 4.

Параметрическая неустойчивость в лазерных интерференционных антеннах. В настоящее время несколько лабораторий в разных странах продемонстрировали работу лазерных гравитационно-волновых детекторов

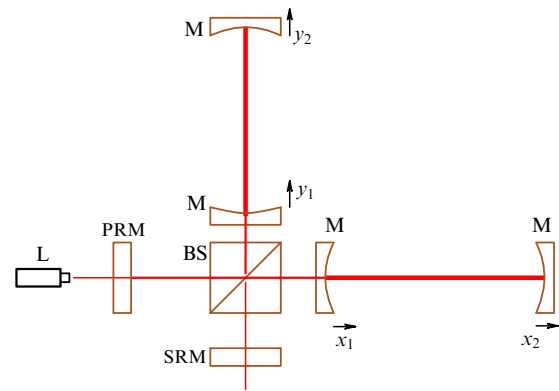


Рис. 5. Упрощённая схема AdLIGO: L — лазер, BS — светоделитель, M — зеркала в плечах, PRM (Power Recycling Mirror) — зеркало рециркуляции мощности, SRM (Signal Recycling Mirror) — зеркало рециркуляции сигнала. Свет, выходящий через тёмный порт (через SRM), несёт информацию о разности длин плеч $[(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)]$.

первого поколения (проекты LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) [20, 21], VIRGO [22], GEO-600 [23], TAMA [24]), и уже сейчас ведутся работы по созданию детекторов второго поколения (Advanced LIGO (AdLIGO), Advanced VIRGO, GEO-HF и пр.), которые позволят в недалёком будущем зарегистрировать гравитационные волны. В детекторах второго поколения планируется значительно увеличить оптическую мощность, циркулирующую в плечах интерферометров (в AdLIGO до 800 кВт). Поэтому вероятность ПКН в лазерных гравитационных детекторах второго поколения будет достаточно велика.

Упрощённая схема интерферометра AdLIGO показана на рис. 5. Два зеркала цилиндрической формы, подвешенные на большом расстоянии (4 км) друг от друга, образуют в одном плече интерферометра первый Фабри–Перо-резонатор, ещё два таких же зеркала образуют другое плечо со вторым Фабри–Перо-резонатором, перпендикулярное первому. Лазерный луч от лазера накачки проходит через светоделитель, расположенный в точке пересечения плеч. Предполагается, что свет многократно отразится от зеркал внутри каждого плеча, прежде чем он вернётся на светоделитель луча. Плечи интерферометра юстируются так, чтобы весь отражённый свет направлялся обратно к лазеру (так называемый яркий порт), а в порт детектора (так называемый тёмный порт) свет не идёт. При воздействии гравитационной волны появляется некоторая разница между длинами плеч, часть света распространяется в тёмный порт и регистрируется фотодетектором. В AdLIGO предполагается достичь значений параметров, перечисленных в таблице.

Таблица. Параметры интерферометра AdLIGO

Мощность	$0,83 \times 10^6$ Вт
Длина плеч	4000 м
Масса зеркала	40 кг
Радиус зеркала	0,17 м
Высота зеркала	0,2 м
Материал	Плавленный кварц

Воздействие гравитационной волны, приводящее к появлению разницы длин плеч, крайне мало — в интерферометре AdLIGO предполагается зарегистрировать разностное смещение порядка $10^{-17} - 10^{-16}$ см за время $\sim 10^{-2}$ с при длине плеча 4 км. Регистрация такого малого смещения предполагает чрезвычайно малые смещения зеркал, вызванные другими причинами — тепловыми, сейсмическими и техническими шумами. Даже незначительные смещения зеркал приводят к тому, что лучи приходят к светоделителю с изменёнными фазами, имитируя тем самым обнаружение гравитационной волны.

Для предсказания неустойчивых комбинаций мод необходима полная информация как об упругих модах, так и об оптических стоковых модах. Частоты и распределения оптических полей на поверхностях зеркал легко рассчитываются аналитически для гауссовых мод резонатора Фабри–Перо [25], в то время как частоты и распределения вектора смещений для упругих мод определяются только численно. (Используется метод суперпозиции в применении только к аксиально-симметричным упругим модам цилиндрического зеркала [26].) Из условия (3) видно, что собственные частоты упругих мод должны иметь ошибку расчёта, меньшую, чем значение коэффициента затухания оптической стоковой моды. При типичных значениях механических частот в интервале от 10 кГц до 100 кГц и времени оптической релаксации, соответствующего частотному интервалу 10–100 Гц, это означает, что относительная точность численного расчёта частот упругих мод должна быть не хуже 10^{-4} . Это требование не всегда выполняется при расчёте упругих мод с использованием, например, численного пакета COMSOL. Заметим также, что неоднородности в распределении плотности, модуля Юнга материала зеркала могут приводить к сдвигу частот упругих мод на уровне 10^{-3} . Например, при использовании пакета ANSYS для численного решения сеточных задач точность расчёта упругих мод составила около 0,5% [8–10, 27]. Таким образом, существующая точность расчёта упругих мод является недостаточной.

К этому надо добавить неточность, вносимую вследствие неоднородности материала зеркал, например, для плавленого кварца относительные вариации плотности находятся на уровне $\delta\rho/\rho \approx 10^{-3}$.

3. Заключение

Итак, перечислим возможные пути избежать параметрической неустойчивости в лазерных гравитационных антеннах второго поколения.

Во-первых, можно искать предвестники, т.е. обнаруживать слабые колебания на стоковых и механических частотах. Это позволит внести малошумящее затухание в акустические моды или изменить спектр оптических мод.

Во-вторых, поскольку теоретический и численный анализ недостаточен, необходимо наблюдение параметрической неустойчивости в реальной антенне. Это позволит отработать различные методики подавления неустойчивости.

Третий путь — понизить оптическую мощность, циркулирующую в плечах интерферометра. Дело в том, что в гравитационных антеннах второго поколения предполагается достичь точности стандартного квантового предела [5] на частотах около 100 Гц. Эта частота

определяется хорошим качеством изоляции от сейсмических шумов. Важно, что необходимая оптическая мощность пропорциональна кубу частоты. Поэтому если удастся перейти от частоты 100 Гц к частоте 30 Гц, то циркулирующая мощность существенно уменьшится — вместо 800 кВт достаточно будет иметь около 20 кВт. Кроме того, в более низком диапазоне частот интенсивность гравитационного излучения, согласно прогнозу, возрастёт.

Список литературы

1. Мигулин В *Труды ФИАН* (3) 77 (1938)
2. Мигулин В *Радиотехника и электроника* **5** 995 (1960)
3. Мигулин В *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3* (6) 67 (1960)
4. Мигулин В В и др. *Основы теории колебаний* (М.: Наука, 1978) [Migulin V V et al. *Basic Theory of Oscillation* (Moscow: Mir, 1983)]
5. Брагинский В Б *Физические эксперименты с пробными телами* (М.: Наука, 1970)
6. Braginsky V B, Strigin S E, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **287** 331 (2001)
7. Braginsky V B, Strigin S E, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **305** 111 (2002)
8. Zhao C et al. *Phys. Rev. Lett.* **94** 121102 (2005)
9. Ju L et al. *Phys. Lett. A* **355** 419 (2006)
10. Ju L et al. *Phys. Lett. A* **354** 360 (2006)
11. Polyakov I A, Vyatchanin S P *Phys. Lett. A* **368** 423 (2007)
12. Kippenberg T J et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 033901 (2005)
13. Matsko A B et al. *Phys. Rev. A* **71** 033804 (2005)
14. Rokhsari H et al. *Opt. Express* **13** 5293 (2005)
15. Savchenkov A A et al. *Phys. Rev. Lett.* **101** 093902 (2008)
16. Grudin I S, Yu N, Lute M *Opt. Lett.* **34** 878 (2009)
17. Del'Haye P et al. *Nature Photon.* **3** 529 (2009)
18. Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A *Science* **332** 555 (2011)
19. Kells W, D'Ambrosio E *Phys. Lett. A* **299** 326 (2002)
20. Abramovici A et al. *Science* **256** 325 (1992)
21. Sigg D et al. (for the LIGO Scientific Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114041 (2008)
22. Acernese F et al. *Class. Quantum Grav.* **25** 114045 (2008)
23. Grote H (for the LIGO Scientific Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114043 (2008)
24. Takahashi R et al. (TAMA Collab.) *Class. Quantum Grav.* **25** 114036 (2008)
25. Kogelnik H, Li T *Appl. Opt.* **5** 1550 (1966)
26. Meleshko V V, Strigin S E, Yakymenko M S *Phys. Lett. A* **373** 3701 (2009)
27. Gras S, Blair D G, Zhao C *Class. Quantum Grav.* **26** 135012 (2009)

PACS numbers: 91.25.Mf, **94.30.-d**, **96.60.-j**
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201203h.0327

Солнечно-земная физика и её приложения

В.Д. Кузнецов

1. Введение

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), которым Владимир Васильевич Мигулин руководил в течение почти 20 лет (с 1969 г. по 1988 г.), является политематическим институтом. В нём представлены разные разделы физики: астрономия и астрофизика, геофизика, радиофизика и физика плазмы, ядерная

В.Д. Кузнецов. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., РФ. E-mail: kvd@izmiran.ru