

УДК 006.91:531.7

ПРОБЛЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И СОЗДАНИЯ ГРАВИМЕТРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В.П. Митрофанов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
Москва,
vpmitrofanov@physics.msu.ru

Представлены основные направления исследований, которые проводит Научная коллаборация LIGO-Virgo с целью повышения чувствительности работающих интерферометрических гравитационно-волновых детекторов, а также рассматриваются разрабатываемые в настоящее время детекторы следующего поколения. Чувствительными элементами гравитационно-волнового детектора являются подвешенные пробные массы, отражающие покрытия которых формируют зеркала интерферометра. Совершенствованию их конструкции и снижению шумов уделяется большое внимание. Эти исследования имеют связь с аналогичными исследованиями, которые направлены на разработку МЭМС гравиметров нового поколения. Вопросы создания и повышения чувствительности таких гравиметров рассмотрены во второй части работы.

Ключевые слова: интерферометрический детектор гравитационных волн, пробные массы, гравиметр.

PROBLEMS OF DETECTING GRAVITATIONAL WAVES AND DEVELOPING OF NEW GENERATION GRAVIMETERS

V.P. Mitrofanov

Moscow State University (Faculty of Physics),
vpmitrofanov@physics.msu.ru

The main research directions that provide the scientific collaboration LIGO-Virgo with the aim of increasing the sensitivity of interferometric gravitational-wave detectors, as well as the next generation detectors currently being developed, are presented. Suspended test masses, the reflective coatings of which form the mirrors of the interferometer, are the sensitive elements of the gravitational-wave detector. These studies are related to similar studies, which are aimed at the development of MEMS gravimeters of a new generation. The issues of creating and increasing the sensitivity of such gravimeters are considered in the second part of the work.

Key words: interferometric detector of gravitational waves, test masses, gravimeter.

Введение

В 2015 г. два детектора Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) впервые зарегистрировали гравитационные волны, порожденные двумя черными дырами в последние доли секунды пе-

ред их слиянием, произошедшим на расстоянии 1,3 миллиарда световых лет от Земли [1]. Впоследствии к детекторам LIGO присоединился гравитационно-волновой детектор Virgo [2], что позволило значительно улучшить локализацию источников. Впервые были зарегистрированы гравитационные волны от двух слившихся нейтронных звезд [3] и идентифицирован их источник, излучение которого было зарегистрировано астрономами в различных участках электромагнитного спектра от гамма-всплесков до радиоволн [4]. За первые два цикла наблюдений, длившихся суммарно около 10 месяцев, сигналы от слияния двойных черных дыр были зарегистрированы еще 9 раз. По результатам этих исследований был опубликован первый каталог сигналов гравитационных волн от сливающихся компактных двойных объектов, наблюдаемых детекторами LIGO и Virgo в течение первого и второго циклов наблюдений [5]. Таким образом, был не только открыт новый гравитационно-волновой канал получения астрофизической информации, но и сформирована новая область исследований – многоканальная астрономия [6].

В настоящее время международная научная коллаборация LSC (LIGO Scientific Collaboration), в состав которой входит группа с физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и группа из Института прикладной физики Нижнего Новгорода, продолжает наблюдения и работает над повышением чувствительности существующих детекторов гравитационных волн. Из возможных потенциальных источников гравитационных волн пока наблюдались сигналы, излучающиеся сливающимися двойными черными дырами и нейтронными звездами. Ожидается, что повышение чувствительности детекторов позволит значительно увеличить область пространства, из которой приходят эти сигналы, значительно улучшить точность, с которой определяется положение источника, наблюдать непрерывное гравитационное излучение от пульсаров, исследовать астрофизический и космологический фон гравитационного излучения, реликтовые гравитационные волны, а также много других интересных объектов. Будет проверена справедливость общей теории относительности в области очень сильных полей и исследовано поведение материи в экстремальных условиях. Детальная программа исследований представлена в [7].

Лазерные интерферометрические детекторы гравитационных волн и шумы, ограничивающие их чувствительность

Схема гравитационно-волнового детектора LIGO представлена на рис.1. По сути это интерферометр Майкельсона с длиной плеч – расстоянием между зеркалами 4 км. Излучение лазера разделяется с помощью светоделителя на два взаимно перпендикулярных луча, которые отражаются от зеркальных покрытий, нанесенных на свободно подвешенные пробные массы, возвра-

падают на светоделитель, интерферируют между собой и попадают на фотоприемник. Сигнал на его выходе зависит от разности фаз в лучах, определяемой разностью пройденных ими путей, которая изменяется под действием гравитационной волны. Лучи света распространяются внутри труб, где поддерживается глубокий вакуум. Чтобы увеличить набег фазы, в каждом плече установлены дополнительные пробные массы с зеркалами, образующие резонаторы Фабри-Перо.

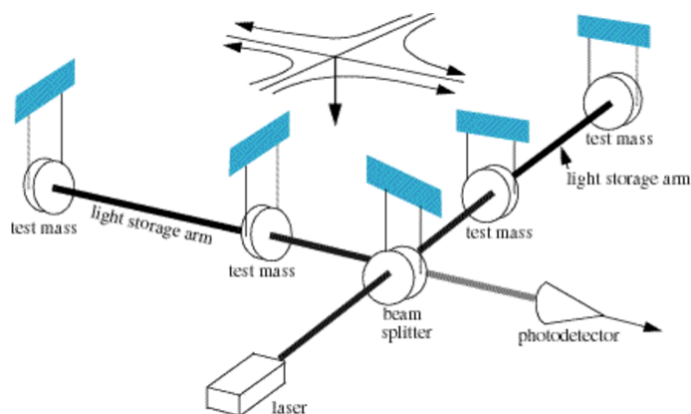


Рис.1 Схема лазерного интерферометрического детектора гравитационных волн LIGO [8]

Детекторы LIGO регистрируют сигналы в диапазоне частот от 30 Гц до 5 кГц. Измеряются колебания пробных масс с амплитудой около 10^{-19} м в этом диапазоне. Это означает, что основной проблемой при разработке детектора является снижение всех видов шумов смещения пробных масс, которые могут маскировать или имитировать полезный сигнал. Шумы имеют различную природу. Среди них колебания земной поверхности, вызванные сейсмическими возмущениями и антропогенными факторами. Они на много порядков превышают изменения расстояния между пробными массами, вызванные гравитационными волнами. По этой причине пробные массы подвешиваются с использованием сложных, многоступенчатых фильтров, подавляющих влияние сейсмических возмущений на пробные массы.

На рис.2 приведены частотные зависимости амплитудной спектральной плотности полного шума смещения пробных масс и его основных составляющих для детектора Advanced LIGO [9]. Они выражены в единицах безразмерной амплитуды гравитационной волны $h = (\Delta L_x - \Delta L_y) / L$, где $\Delta L_{x,y}$ – изменение расстояния L между свободными пробными массами детектора в плечах x и y интерферометра под действием гравитационной волны. В наиболее чувствительной средней части рабочего диапазона (30-500 Гц) основными факторами, ограничивающими чувствительность детектора, явля-

ются тепловой шум в отражающих покрытиях пробных масс и квантовый шум. Рассмотрим их более подробно.

Тепловой шум в зеркальных покрытиях пробных масс

Высокоотражающие покрытия пробных масс гравитационно-волнового детектора состоят из 30 чередующихся четвертьволновых слоев, состоящих из материалов с низким и высоким оптическими показателями преломления: двуокиси кремния (SiO_2) с $n = 1,45$ и пятиокиси тантала с примесью двуокиси титана ($\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$) с $n = 2,07$. Существует несколько механизмов, вызывающих дополнительный шум в детекторе, связанных с отражающими покрытиями на пробных массах [10]. Но главную роль играют внутренние механические потери в материалах покрытий, которые являются источником так называемого Броуновского теплового шума, обусловленного тепловым движением атомов и молекул, причем основной вклад дает пятиокись тантала, для которой тангенс угла механических потерь ϕ составляет $2,4 \cdot 10^{-4}$, что значительно превышает его значение для двуокиси кремния равное $4 \cdot 10^{-5}$ [11].

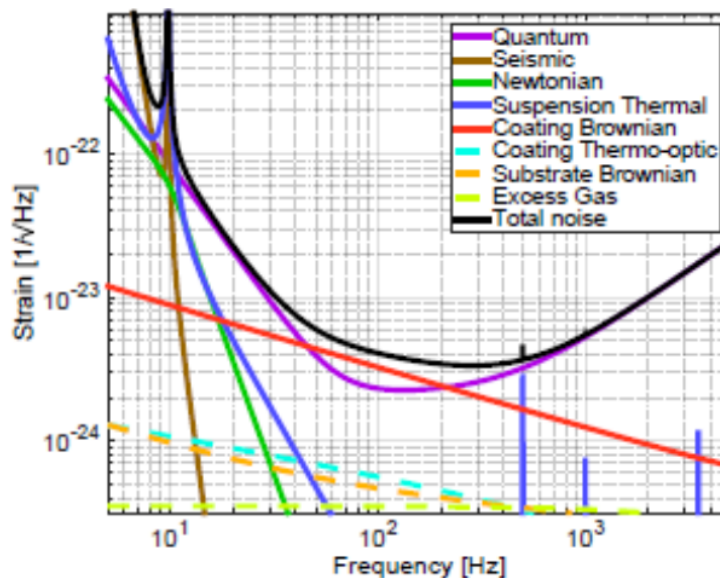


Рис. 2. Амплитудная спектральная плотность полного шума смещения пробных масс и его основных составляющих, выраженная в безразмерных единицах h [9]

Выражение для спектральной плотности мощности теплового шума смещения торцевой поверхности пробной массы $S_L(f)$ на частоте f , обусловленного потерями в слое покрытия толщиной d , нанесенного на эту поверхность, можно приближенно записать в виде [10]:

$$S_L(f) \approx \frac{2k_B T d}{\pi^2 f r^2 Y} \phi,$$

где k_B - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, r - радиус светового пучка на пробной массе, Y - Модуль Юнга материала отражающего покрытия.

Перед исследователями стоит задача увеличения чувствительности детекторов Advanced LIGO по крайней мере в два раза в ближайшее время. Это требует снижения механических потерь в материале отражающего покрытия пробных масс с более высоким показателем преломления в четыре раза. С этой целью ведутся интенсивные исследования по совершенствованию технологии нанесения покрытий и их термической обработке, поиску новых материалов для покрытий, в частности аморфных пленок из альтернативных оксидов и других материалов [12], а также кристаллических пленок, например, (GaP:AlGaP) [13].

Квантовый шум

Квантовый шум возникает из-за квантовых флуктуаций оптического излучения, поступающего в интерферометр. Они проявляются как фотонный дробовой шум, связанный с флуктуациями числа фотонов, падающих на фотодетектор. Фотонный дробовой шум ограничивает чувствительность гравитационно-волновых детекторов Advanced LIGO в области высоких частот. Вызванная им амплитудная спектральная плотность флуктуаций относительного расстояния между пробными массами определяется следующим выражением [14]:

$$\tilde{h}_{\text{PSN}}(f) = \sqrt{\frac{\pi \hbar \lambda}{\eta P_{\text{BS}} c} \frac{\sqrt{1 + (4\pi f \tau_s)^2}}{4\pi \tau_s}},$$

где λ - длина волны оптического излучения, \hbar - постоянная Планка, c - скорость света, τ_s - время жизни фотона в оптическом резонаторе в плече интерферометра, η - квантовый выход фотодетектора, P_{BS} - мощность оптического излучения, падающего на светоделитель. Заметим, что амплитудная спектральная плотность этого шума обратно пропорциональна квадратному корню из мощности оптического излучения в интерферометре. Это означает, что нужно повышать циркулирующую в плечах интерферометра мощность оптического излучения для того, чтобы снизить уровень квантового шума, который увеличивается в высокочастотной области рабочего диапазона частот гравитационно-волнового детектора.

С другой стороны, свет, падающий на зеркальную поверхность пробной массы, оказывает на нее световое давление. Сила светового давления флуктуирует из-за флуктуаций числа падающих фотонов и вызывает флуктуации положения пробной массы, создавая шум радиационного давления. Смещение пробной массы, которую можно считать свободной в рабочем диапазоне частот детектора, под действием силы светового давления увеличивается с уменьшением частоты, поэтому этот шум, называемый шумом радиационного давления, проявляется сильнее в области низких частот. Его амплитудная спектральная плотность выражается в следующем виде [14]:

$$\Delta L_{\text{RPN}}(f) = \frac{1}{2f^2 mc} \sqrt{\frac{\hbar P}{\pi^3 \lambda}},$$

где m – величина пробной массы, P – мощность оптического излучения, циркулирующего в плечах интерферометра.

Полная величина квантового шума описывается суммой спектральных плотностей мощности дробового фотонного шума и шума радиационного давления, причем для уменьшения первого нужно увеличивать мощность оптического излучения, циркулирующего в плечах интерферометра, а для уменьшения второго нужно, наоборот, ее уменьшать. Таким образом, существует оптимальное значение мощности, при котором минимизируется полная спектральная плотность мощности квантового шума. Это минимальное значение мощности шума определяет минимальное изменение расстояния между пробными массами, которое может быть измерено при использовании интерферометрической схемы измерения изменения их координат. Впервые оно было найдено В.Б. Брагинским и получило название «стандартного квантового предела» (СКП) [15]:

$$\Delta L_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2\hbar}{m}}.$$

СКП определяет предельную чувствительность гравитационно-волнового детектора. Он показывает, что ее можно улучшить, увеличивая саму величину пробных масс и длину плеч интерферометра. Но для того, чтобы достигнуть стандартного квантового предела, необходимо подавить все другие виды шумов в интерферометре, препятствующие его достижению. Вторая задача, которую необходимо решить, состоит в том, чтобы найти способы преодоления СКП. СКП, описываемый приведенной выше формулой, справедлив для определенного способа измерений, а именно, непрерывных измерений координаты пробной массы. Возможно измерение других перемен-

ных, например, скорости свободной пробной массы, что позволяет преодолеть этот предел [16].

На практике повышение мощности оптического излучения, циркулирующего в интерферометре, приводит к искажению волнового фронта из-за термических деформаций зеркал, что требует введения дополнительных элементов для их компенсации. Кроме того, возникают угловые и параметрические нестабильности, нарушающие работу интерферометра, которые необходимо подавлять [17]. Избежать этих трудностей позволяет использование сжатых вакуумных состояний света, инжектируемых в выходной порт интерферометра [18, 19].

В отличие от когерентного состояния оптического излучения лазера, для которого неопределенности фазы и числа фотонов, подчиняющиеся соотношению неопределенности Гейзенберга, равны между собой, можно приготовить сжатые состояния, для которых неопределенность фазы будет значительно меньше, чем неопределенность числа фотонов.

Предполагается, что степень сжатия в модернизированных детекторах Advanced LIGO достигнет не менее 10 дБ, что равносильно уменьшению спектральной плотности мощности фазового шума в 10 раз без десятикратного увеличения мощности оптического излучения. Поскольку в гравитационно-волновом детекторе регистрируется изменение разности фаз оптического излучения в плечах интерферометра, то уменьшение флуктуаций фазы приводит к увеличению чувствительности интерферометра без повышения мощности лазерного излучения в его плечах. Сжатое вакуумное состояние приготавливается с помощью вырожденного оптического параметрического усиления в оптическом резонаторе, в который помещается кристалл, обладающий квадратичной нелинейностью [20]. Заметим, что любые оптические потери, возникающие при передаче сжатого света от генератора к выходному фотодиоду, приводят к уменьшению степени сжатия света. По этой причине снижение оптических потерь играет важную роль для достижения максимальной степени сжатия.

Как уже отмечалось ранее, уменьшение фазовых флуктуаций в сжатом свете сопровождается увеличением флуктуаций амплитуды, что приводит к увеличению шума радиационного давления и уменьшению чувствительности гравитационно-волнового детектора при низких частотах. Для исключения этого эффекта используется так называемое частотно-зависимое сжатие, суть которого состоит в использовании света, который сжат по фазе на высоких частотах и сжат по амплитуде или по числу фотонов на низких частотах рабочего частотного диапазона детектора гравитационных волн. Для того чтобы уменьшить квантовый шум на всех частотах, используют дополнительный оптический резонатор, называемый фильтрующим резонатором [21]. Сжатый свет поступает в выходной порт интерферометра, отразившись

от фильтрующего резонатора, который расстроен относительно частоты света. Выбирая нужным образом полосу частот фильтрующего резонатора и величину отстройки, получают одновременное снижение фотонного дробового шума и шума радиационного давления во всем диапазоне частот детектора гравитационных волн [22]. Оптическая схема инъекции сжатого света в выходной порт гравитационно-волнового интерферометра представлена на рис. 3 [20].

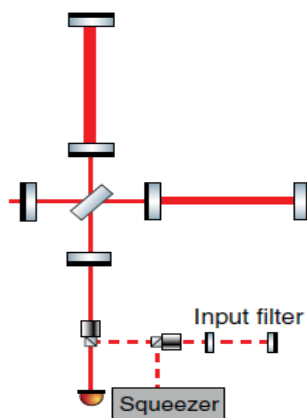


Рис. 3. Оптическая схема инъекции сжатого света в гравитационно-волновой интерферометр с использованием фильтрующего резонатора [20]

Проект LIGO-Voyager криогенного детектора гравитационных волн

Рассмотрев влияние квантового шума на чувствительность гравитационно-волнового детектора и способы его подавления, вернемся к тепловому шуму пробных масс детектора и их зеркальных покрытий. В работающих в настоящее время детекторах LIGO и Virgo все элементы находятся при комнатной температуре. Но когда речь идет о подавлении теплового шума, то прямым способом его уменьшения является охлаждение до низких температур чувствительных элементов детектора – пробных масс. Однако, при охлаждении пробных масс, изготовленных из плавленого кварца, увеличиваются механические потери в материале пробных масс, а следовательно, согласно флуктуационно-диссипационной теореме, увеличивается их тепловой шум. Это следствие специфического механизма потерь, существующего в материалах со структурой стекла, к которым относится плавленый кварц [23]. В отличие от плавленого кварца кристаллические материалы, в частности сапфир и кремний, обладают очень малыми механическими потерями, как при комнатной температуре, так и при низких температурах. Кремний обладает также малыми оптическими потерями для излучения с длиной волны больше, чем 1,5 мкм [24]. Разработаны промышленные методы выращивания монокристаллов сапфира и кремния больших размеров. Именно из

этих материалов предполагается изготавливать пробные массы криогенных детекторов гравитационных волн [25, 26, 27]. Такой проект криогенного гравитационно-волнового детектора разрабатывается научной коллаборацией LIGO под названием LIGO-Voyager [9]. Кремниевые пробные массы ($m \approx 200\text{--}300$ кг) будут охлаждаться до температуры около 123 К, при которой коэффициент теплового расширения кремния проходит через ноль [28], что означает полное подавление термоупругого шума в пробных массах и их кремниевых подвесах. Термоупругий шум является важной составляющей теплового шума в детекторе [29]. При температуре 123 К кремний также имеет малое оптическое поглощение на длинах волн около 2,0 мкм и достаточно высокий коэффициент теплопроводности, что уменьшает тепловые искажения при прохождении лазерного луча через промежуточную пробную массу гравитационно-волнового детектора.

Предполагается, что для создания гравитационно-волновых криогенных детекторов LIGO-Voyager будет использоваться инфраструктура (вакуумные камеры и трубы) существующих детекторов Advanced LIGO. Они будут построены к 2030 г., а их чувствительность, определяемая по расстоянию, на котором детекторы регистрируют сигнал от условного стандартного источника (слияние двух нейтронных звезд с массами, равными 1,4 массы Солнца), увеличится более, чем в три раза по сравнению с существующими детекторами. Для того чтобы реализовать проект LIGO-Voyager, необходимо решить несколько научно-технических задач. Одна из них относится к разработке чувствительных элементов детектора, коими являются свободно подвешенные кремниевые пробные массы, поддерживаемые при температуре 123 К. Подвес пробных масс обеспечивает свободное их движение в горизонтальном направлении на частотах > 10 Гц, которые значительно превышают частоту собственных маятниковых колебаний. Он состоит из четырех ступеней, каждая из которых играет роль механического фильтра, ослабляющего воздействие на пробные массы внешних сейсмических и акустических возмущений. Нижняя ступень подвеса собственно пробной массы должна обеспечить минимальный уровень теплового шума, как для движения ее центра масс, так и для движения ее зеркальной поверхности, отражающей лазерное излучение. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, для уменьшения уровня теплового шума необходимо уменьшать механические потери мод колебаний пробных масс, дающих вклад в горизонтальное движение отражающей поверхности зеркал. Прежде всего, это маятниковая мода колебаний подвешенной пробной массы. Для подвеса могут быть использованы либо выращенные монокристаллические кремниевые нити, либо полоски, вытравленные из монокристаллических кремниевых пластин методами химического травления [30]. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что использование метода гидроксид-

но-каталитического соединения для соединения кремниевой полоски с кремниевой пробной массой обеспечивает приемлемую для проекта LIGO-Voyager величину механических потерь в месте такого квазимонолитного соединения и связанного с ними уровня дополнительного шума [31].

Охлаждение пробных масс серьезно усложняет конструкцию детектора. Необходимо решить множество дополнительных научно-технологических проблем. Например, для того, чтобы поддерживать рабочую температуру пробной массы 123 К, необходимо отводить около 10 Вт тепловой мощности от поглощаемого ею лазерного излучения в условиях высокого вакуума. Это можно сделать через тепловое излучение на экран, охлаждаемый жидким азотом, но для этого нужно повысить излучательную способность боковой поверхности кремниевой пробной массы, поскольку излучательная способность кремния слишком мала. С этой целью предлагается на боковую поверхность специальное покрытие с высокой излучательной способностью, такое, что тепловой шум, вызванный дополнительными механическими потерями, которые создает это покрытие, незначительно повышал бы полный уровень шума пробной массы. Проведенные исследования позволили найти такие покрытия [32,33].

Будущие детекторы гравитационных волн третьего поколения.

Согласно «Стандартному квантовому пределу», определяющему предельную чувствительность интерферометрического детектора гравитационных волн, ее можно улучшить, только увеличивая величину пробных масс и длину плеч интерферометра. Это определяет стратегию создания будущих гравитационно-волновых детекторов нового поколения. Такой европейский проект называется «Эйнштейн телескоп» (Einstein Telescope) [34]. В отличие от гравитационно-волнового интерферометра с взаимно перпендикулярным расположением двух плеч в новом детекторе будет три плеча, и они будут располагаться в виде равностороннего треугольника с длиной сторон 10 км. Таким образом, формируются три отдельных двухплечных интерферометра с центрами разделения и обратного соединения лазерных лучей в каждом из углов треугольника. Кроме того, каждый детектор разделяется на две части. Одна оптимизируется для работы в диапазоне низких частот (5-200 Гц), вторая в диапазоне высоких частот (200-2000 Гц). Лазерные лучи всех шести интерферометров распространяются в общей вакуумной системе. Гравитационно-волновой детектор «Эйнштейн телескоп» будет размещен под землей. Это позволит уменьшить воздействие на пробные массы детекторов сейсмических и акустических возмущений, а также флуктуаций гравитационного взаимодействия пробных масс с окружением (Ньютоновский шум), возникающих из-за локальных сейсмических колебаний земной поверхности, изменений атмосферного давления, человеческой активности.

Еще большую длину плеч, равную 40 км, и пробные массы весом около 300 кг будет иметь новый интерферометрический детектор гравитационных волн Cosmic Explorer, который планируется построить в США [35]. В проекте будет две стадии. Первая включает создание детектора, пробные массы которого изготовлены из плавленого кварца и поддерживаются при комнатной температуре. Во второй стадии они будут заменены на кремниевые, охлаждаемые до температуры 123 К. Новые детекторы вступят в строй в 2030-х годах, и их чувствительность будет более, чем на порядок выше, чем у работающих в настоящее время.

МЭМС гравиметры нового поколения

Уникальные технологии создания высокочувствительных измерительных систем с пробными массами, разработанные участниками проектов LIGO и Virgo, могут быть использованы в других областях науки и техники. Так, в последнее время интерес исследователей привлекает создание нового поколения малогабаритных, относительно недорогих, но очень чувствительных и стабильных относительных гравиметров [36,37]. Относительные гравиметры определяют относительное изменение ускорения свободного падения, измеряя смещение пробной массы, подвешенной на пружине. Для создания таких пружин используется концепция «геометрической антипружины» (geometric anti-spring – GAS). Такие нелинейные пружины были разработаны участниками гравитационно-волновой коллаборации с целью понижения резонансной частоты механической колебательной системы для движения в вертикальном направлении. Они применяются в системах сейсмоизоляции пробных масс детекторов гравитационных волн [38]. Для изготовления чувствительных элементов новых гравиметров используется монокристаллический кремний. Как уже отмечалось, этот материал имеет малые механические и оптические потери, стабильную кристаллическую структуру. Технология изготовления механических колебательных систем из кремния хорошо отработана. Используются различные методы химического травления кремния, которые используются при создании микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Подвес кремниевой пробной массы гравиметра, разработанного в Университете г. Глазго, (Шотландия), представлен на рис. 4 [36]. Пробная масса и пружины образуют монолитную структуру, изготовленную из кремниевой пластины толщиной 200 μm методом реактивного ионного травления в газах на основе фтора (SF_6 , C_4F_8). Изогнутые кантилеверы размером 5 мкм \times 200 мкм, соединенные с пробной массой, создают геометрическую нелинейность, так что резонансная частота вертикальных колебаний пробной массы составляет 2,3 Гц.

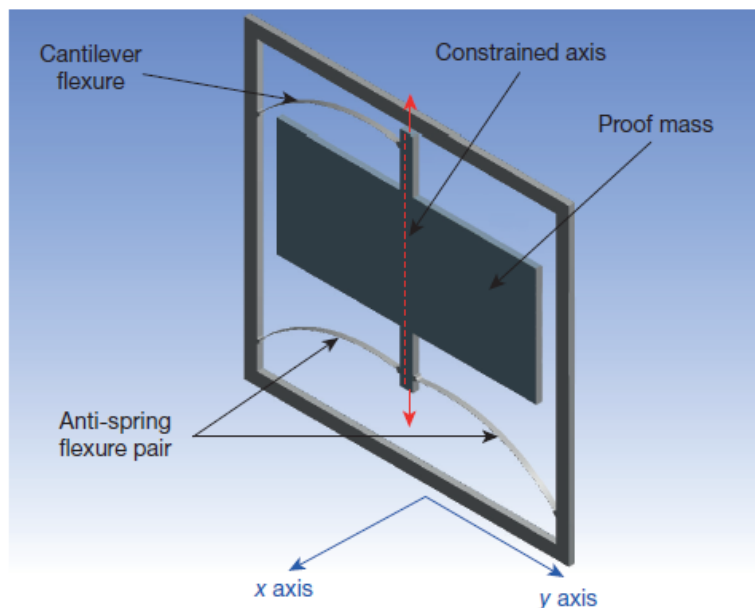


Рис. 4. Монолитный подвес пробной массы гравиметра с использованием геометрических анти-пружин [36]

Для регистрации смещения пробной массы гравиметра требуется датчик с высокой стабильностью и чувствительностью. Такой оптический теневой датчик был разработан на основе аналогичных устройств, используемых в гравитационно-волновом детекторе LIGO [39]. Пробная масса гравиметра располагается между источником света, в качестве которого используется светодиод, и фотоприемником, расщепленным фотодиодом. Движение пробной массы в вертикальном направлении изменяет перекрытие светового луча, падающего на фотодиод и его выходной ток. Чувствительность датчика составляет около $2 \text{ нм}/\sqrt{\text{Гц}}$. Она может быть значительно улучшена, если использовать интерферометрический сенсор, установленный на том же чипе, что и пробная масса [40].

К настоящему времени наилучшие показатели получены для МЭМС гравиметров, разработанных в Университете г. Глазго (Шотландия) [36] и Уханьском университете (Китай) [37]. Их чувствительность составила 40 и 8 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$ соответственно. Авторы продемонстрировали их стабильность и чувствительность, измеряя приливные изменения силы тяжести на поверхности Земли. МЭМС гравиметры пока еще не достигли параметров, показываемых лучшими традиционными относительными гравиметрами, но

по малым габаритам они уже существенно их опережают и имеют значительный потенциал для дальнейшего совершенствования.

Заключение

Создание уникальных гравитационно-волновых детекторов научными коллаборациями LIGO-Virgo и первая регистрация гравитационных волн от слияния черных дыр, а затем и нейтронных звезд, явилось важнейшим достижением науки и технологий, открыло новую область знания – гравитационно-волновую астрономию. Увеличение чувствительности детекторов позволит получить важную информацию о строении Вселенной, новых формах материи, проявлении физических законов в экстремальных условиях. Участники научных коллабораций разрабатывают новые методы квантовых измерений, исследуют новые материалы для низкошумящих покрытий зеркал интерферометров, разрабатывают технологии создания уникальных элементов конструкции гравитационно-волновых детекторов. Эти разработки могут использоваться и уже используются в других областях науки и техники, в частности, в новом поколении относительных гравиметров, которые успешно разрабатываются в нескольких лабораториях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 19-29-11003.

Литература

1. Abbott B.P. Et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger // *Phys. Rev. Lett.* 2016. 116. 061102.
2. Acernese F. et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector // *Class. Quantum Grav.* 2015. 32. 024001.
3. Abbott B.P. et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // *Phys. Rev. Lett.* 2017. 119. 161101.
4. Abbott B.P. et al. Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // *Astrophys. J. Lett.* 2017. 848. L12.
5. Abbott B. P. et al. GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs // *Phys. Rev.* 2019. X 9. 031040.
6. Черепашук А.М., Алексеев А.А., Белинский С.О. Многоканальная астрономия – М.: Век-2, 2019.
7. LIGO Scientific Collaboration. LSC program. <https://dcc.ligo.org/LIGO-M1800085/public>, 2018.
8. <https://www.ligo.org/science/GW-IFO.php>
9. Aasi J., et al. Advanced LIGO // *Class. Quantum Gravity.* 2015. 32 (7), 074001. Instrument science white paper, 2019. LIGO Technical Note, LIGO-T1900409–v3.

10. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Vyatchanin S.P. Compendium of thermal noises in optical mirrors in *Optical Coatings and Thermal Noise in Precision Measurement*, (Eds Harry G., Bodiya T.P., DeSalvo R.) -Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012.
11. Vajente G., Birney R., Ananyeva A. et al. Effect of elevated substrate temperature deposition on the mechanical losses in tantala thin film coatings // *Class. Quantum Grav.* 2018. 35. 075001.
12. Liu X et al., Hydrogen-free amorphous silicon with no tunneling states // *Phys. Rev. Lett.* 2014. 113 025503.
13. Cumming A.V. et al. Measurement of the mechanical loss of prototype GaP/AlGaP crystalline coatings for future gravitational wave detectors// *Class. Quantum Grav.* 2015. 32, 035002.
14. Abbot B.P. et al LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory // *Rep. Prog. Phys.* 2009. 72 076901.
15. Брагинский В.Б., Классические и квантовые ограничения при обнаружении слабых воздействий на макроскопический осциллятор// *ЖЭТФ.* 1967. 53. 1434.
16. Danilishin S.L., Khalili F.Ya., Miao H., Advanced quantum techniques for future gravitational-wave detectors // *Living Reviews in Relativity.* 2019. 22. 2.
17. Braginsky V. B., Strigin S. E., Vyatchanin S. P., Parametric oscillatory instability in Fabry-Perot interferometer // *Phys. Lett.* 2001. A 287, 331.
18. Caves C. M. Quantum-mechanical noise in an interferometer// *Phys.Rev.* 1981. D 23 1693.
19. Barsotti L., Harms J., Schnabel R., Squeezed vacuum states of light for gravitational-wave detectors // *Rep. Prog. Phys.* 2019. 82. 016905.
20. Wu L. A., Kimble H. J., Hall J. L. and Wu H. Generation of Squeezed States by Parametric Down Conversion // *Phys. Rev. Lett.* 1986. 57. 2520.
21. Kimble H. J., Levin Y., Matsko A. B., Thorne K. S. and Vyatchanin S. P. Conversion of conventional gravitational-wave interferometers into quantum nondemolition interferometers by modifying their input and/or output optics// *Phys. Rev.* 2001. D 65 022002.
22. Халили Ф.Я. Квантовые измерения в детекторах гравитационных волн. УФН, 2016. 186. 1059.
23. Anderson O., Bommel H. Ultrasonic Absorption in Fused Silica at Low Temperatures and High Frequencies // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1955. 38. 125.
24. Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Markosyan A., Gorodetsky M.L. Billion Q-factor in silicon WGM resonators// *Optica.* 2018. 5. 1525.
25. Nawrodt R., Rowan S., Hough J. et al. Challenges in thermal noise for 3rd generation of gravitational wave detectors // *Gen. Relativ. Gravit.* 2011. 43, 593.

26. Mitrofanov V. P., Chao S., Pan H-W. et al. Technology for the next gravitational wave detectors // *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 2015. 58. 120404.
27. Akutsu T., Ando M., Arai K. et al. KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector// *Nat. Astron.* 2019. 3. 35.
28. Swenson C. A., Recommended Values for the Thermal Expansivity of Silicon from 0 to 1000 K // *Phys. Chem. Ref. Data.* 1983. 12, 179.
29. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Vyatchanin S.P. Thermodynamical fluctuations and photo-thermal shot noise in gravitational wave antennae// *Phys. Lett.* 1999. A. 264, 1.
30. Prokhorov L.G. and Mitrofanov V.P., Mechanical losses of oscillators fabricated in silicon wafers // *Class. Quantum Grav.* 2015. 32. 195002.
31. Prokhorov L.G., Koptsov D.V., Matushechkina M.S., Mitrofanov V.P., Haughian K., Hough J., Rowan S., van Veggel A.A., Murray P. G., Hammond G. D., Tokmakov K. Upper limits on the mechanical loss of silicate bonds in a silicon tuning fork oscillator// *Phys. Lett.* 2018. A. 382, 2186.
32. Abernathy M.R., Smith N., Korth W.Z., Adhikari R.X., Prokhorov L.G., Koptsov D.V. and Mitrofanov V.P. Measurement of mechanical loss in the Aektar Black coating of silicon wafers// *Class. Quant. Grav.* 2016. 33(18). 185002.
33. Prokhorov L.G., Mitrofanov V.P., Kamai B., Markowitz A., Xiaoyue Ni, Adhikari R.X. Measurement of mechanical losses in the carbon nanotube black coating of silicon wafers// *Class. Quant. Grav.* (to be published).
34. Punturo M. et al. The Einstein Telescope: A third-generation gravitational wave observatory // *Class. Quant. Grav.* 2010. 27. 194002.
35. Reitze D. et al. Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO. 2019, arXiv:1907.04833 [astro-ph.IM].
36. Middlemiss R.P. et al. Measurement of the Earth Tides with a MEMS Gravimeter // *Nature.* 2016. 531. 614.
37. Tang S. et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range// *Microsystems & Nanoengineering.* 2019. 5. 45.
38. Cella G., Sannibale V., DeSalvo R. et al. Monolithic geometric anti-spring blades// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2005. A 54. 502.
39. Carbone L. et al. Sensors and actuators for the Advanced LIGO mirror suspensions// *Class. Quantum Grav.* 2012. 29. 115005.
40. Noack A., Middlemiss R., Prasad A., Hammond G. MEMS gravity sensors for imaging density anomalies// *Proc. SPIE.* 2018. 10723, 107230J.