

11;12

Диссипация энергии механических осцилляторов, вызванная электрическим полем, приложенным к поверхности колеблющегося тела

© Н.А. Вишнякова, М.Л. Городецкий, В.П. Митрофанов,
К.В. Токмаков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию 16 апреля 1997 г.

В окончательной редакции 22 декабря 1997 г.

Обсуждены различные обстоятельства, влияющие на затухание крутильных колебаний маятника. Наиболее вероятными приняты затухания из-за диссипативных процессов поверхностной диффузии или перезарядки поверхностных состояний.

Разработка антенн для регистрации гравитационного излучения от космических источников стимулировала создание высокочастотных механических осцилляторов маятникового типа. В ряде экспериментальных работ было отмечено, что один из источников диссипации, ограничивающих добротность таких систем, связан с воздействием на колеблющееся тело внешних электрических полей [1,2]. Целью настоящей работы являлось исследование затухания механических колебаний осциллятора в случае, когда электрическое поле создается между проводящей поверхностью колеблющегося тела и поверхностью специального электрода.

Основная часть экспериментов была выполнена с маятником, конструкция которого изображена схематически на рис. 1. Алюминиевый диск диаметром 6 см и массой около 100 г подвешивался на трифилярном подвесе из вольфрамовых проволок диаметром 100 μm . Резонансная частота крутильных колебаний такого маятника составляла около 1 Нз. На нижней поверхности диска были сделаны радиальные выступы с шагом 2 мм (рис. 1). Электрическое поле создавалось между телом маятника и электродом, установленным под диском маятника

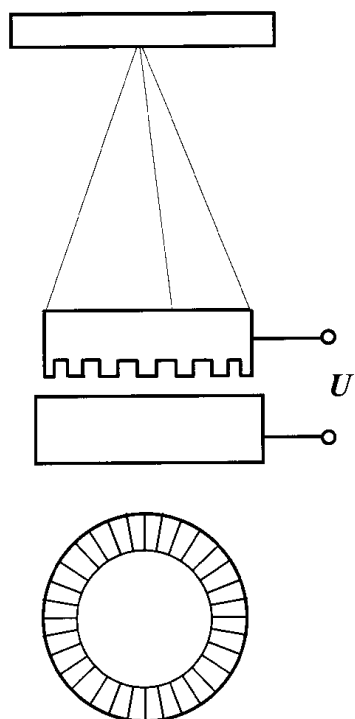


Рис. 1. Схематическое изображение маятника и схема приложения электрического поля.

параллельно ему. В качестве электрода использовались плоские диски, изготовленные из алюминия, латуни и кремния. Зазор между электродом и маятником мог изменяться от 0.2 до 2 мм. Крутильные колебания маятника возбуждались резонансной силой, возникающей при приложении периодического электрического напряжения к дополнительному электроду, и регистрировались с помощью емкостного датчика. Вносимые потери определялись как разность между обратными значениями добротности колебаний маятника, измеренными при включенном и выключенном электрическом поле. Измерения проводились в специальной камере, в которой создавалась либо контролируемая атмосфера, либо вакуум.

Выбор конструкции маятника и электрода, формирующего поле, определялся необходимостью создавать высокую напряженность электрического поля в зазоре между ними, не внося заметную дополнительную жесткость в колебательную систему. Это позволяло исключить диссипацию механической энергии маятника, обусловленную, во-первых, джоулевыми потерями на сопротивлении в цепи подачи электрического напряжения, вызванными электрическим током, протекающим в этой цепи из-за изменения емкости между создающим поле электродом и колеблющимся телом, во-вторых, связью между исследуемым осциллятором и электродом, вызванной электрическим полем [2].

При включении электрического напряжения между телом маятника и нижним электродом наблюдалось увеличение затухания его колебаний. Эффект имел место, когда маятник находился как в вакууме, так и в комнатной атмосфере. В последнем случае вносимое затухание было значительно больше. Подчеркнем, что речь идет не о потерях, вызванных газовым трением, так как определялась разность потерь в поле и без поля. На рис. 2, *a* приведены зависимости вносимых потерь Q_e^{-1} от напряжения U , приложенного между телом маятника и нижним электродом, разделенных зазором 0.5 mm. Нижний электрод был изготовлен из кремния *p*-типа с удельным сопротивлением $20 \Omega \cdot \text{см}$. Кривые были получены при различном газовом окружении. Кривая 1 построена по результатам измерений, выполненных в атмосфере сухого азота. В пределах ошибок измерений она совпадает с аналогичной зависимостью, измеренной в вакууме при давлении 10^{-2} Torr. Кривая 2 была получена в атмосфере азота с небольшим количеством водяных паров, кривая 3 — при измерениях в комнатной атмосфере при относительной влажности воздуха около 70%. Хорошо наблюдаемый во влажной атмосфере гистерезис в вакууме проявлялся менее явно. Отметим, что характер и величина эффекта не зависели от полярности приложенного напряжения. Интересно также отметить, что если между маятником и нижней пластиной прикладывалось переменное электрическое поле с частотой 300 Hz и выше, то в пределах ошибки измерений дополнительное затухание не наблюдалось. Кроме того, было установлено, что величина вносимого затухания не остается постоянной после включения электрического поля. Характер этого изменения также зависел от состояния окружающей атмосферы. Аналогичные эффекты наблюдались для алюминиевого или латунного нижнего электрода. В этом случае эффект также сильно возрастал при увеличении влажности окружающей

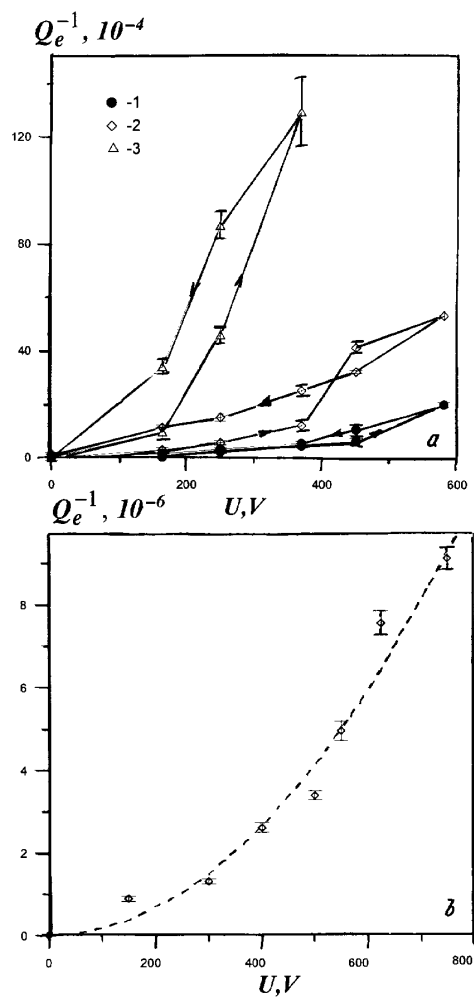


Рис. 2. Зависимость потерь, вызванных электрическим полем, от напряжения, приложенного между маятником и электродом; *a* — для случая, когда пластина электрода изготовлена из кремния. Измерения выполнены при различном составе окружающей газовой среды: 1 — сухой азот; 2 — азот с небольшим количеством водяных паров; 3 — воздух при влажности $\approx 70\%$. *b* — для алюминиевого покрытия маятника и электрода при давлении $\approx 10^{-4}$ Торг.

атмосферы, хотя был в $3 \div 5$ раз меньше, чем для кремниевого электрода при прочих равных условиях.

На рис. 2, *b* представлена зависимость вносимых потерь Q_e^{-1} , вызванных электрическим полем, от приложенного напряжения в случае, когда проводящее покрытие маятника и электрода было сделано из алюминия. Зазор между маятником и электродом составлял 2 мм. Использовался маятник, подвешенный на кварцевых нитях и потому имеющий высокую собственную добротность в отсутствие электрического поля [1]. Измерения проводились в вакууме при давлении 10^{-4} Торр. Экспериментальная зависимость достаточно хорошо аппроксимировалась квадратичной функцией (изображенной пунктирной линией на рис. 2, *b*).

Заслуживает внимания еще один интересный эффект. В экспериментах, проводимых при атмосферном давлении, дополнительное затухание маятника наблюдалось и при отсутствии внешнего электрического поля, например, если поле было приложено в течение некоторого времени, а затем выключено или при сильном изменении влажности окружающей атмосферы.

Затухание в исследуемых маятниках, возникающее при приложении электрического поля, в общем случае может быть обусловлено рядом факторов. Например, действующая на маятник пондеромоторная сила изменяет натяжение в нитях подвеса. Однако проведенные нами экспериментальные исследования показали, что изменение натяжения нитей подвеса в отсутствие поля пренебрежимо слабо влияет на добротность маятника. Отсутствие электрических разрядов в промежутке между электродами, которые также могли вносить дополнительные потери в колебания маятника, контролировалось по измерению шума в цепи подачи электрического напряжения. Разряды сопровождались избыточным шумом. При колебаниях маятника в электрическом поле на нижнем электроде и расположенных рядом проводящих поверхностях возникают наведенные токи. Затухание, обусловленное наведенными токами, зависит от объемного удельного сопротивления материалов. Расчет показал, что для исследуемых материалов (кремний, алюминий, латунь) это затухание много меньше наблюдаемого в представленных экспериментах. Кроме того, указанные процессы должны иметь место и при приложении переменного напряжения между маятником и электродом, но в этом случае дополнительное затухание колебаний маятника не наблюдалось.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что диссипация, вносимая в механический осциллятор электрическим полем, зависит от состояния поверхностей колеблющегося тела и электрода, между которыми приложено поле. Как известно, электрофизическое состояние поверхности в значительной степени определяется составом окружающей атмосферы и может сильно меняться при адсорбции, например, молекул воды [3]. Можно предположить, что одним из возможных механизмов диссипации энергии осциллятора является поверхностная диффузия адсорбированных атомов, обусловленная существенной неоднородностью электрического поля. В частности, молекулы воды, обладающие высоким статическим дипольным моментом, могут перемещаться под действием градиента поля. При измерениях затухания колебаний маятника, вызванного электрическим полем, производящихся в вакууме, вклад в диссипацию диффузионных процессов на поверхности уменьшается. Однако в этом случае может проявиться другой механизм потерь, связанный с наличием локализованных поверхностных состояний. Приложенное к поверхности электрическое поле меняется при колебаниях маятника, вызывая переход носителей заряда из объема на поверхностные состояния и обратно или с одних поверхностных уровней на другие. В зависимости от величины приложенного напряжения, толщины слоя окисла, состава окружающей газовой атмосферы перехода заряда на поверхностные состояния под действием электрического поля может осуществляться различными механизмами: диффузионным, туннельным, прыжковым. Важно, что все эти процессы имеют диссипативный характер в исследуемых системах вызваны колебаниями тела, а значит, сопровождаются рассеянием упругой энергии осциллятора. Заметим, что поверхностные диффузионные процессы наблюдаются, например, при исследовании поверхностей с помощью сканирующего туннельного микроскопа, где сильное электрическое поле создается между иглой и поверхностью [4]. Одной из величин, характеризующих поверхностные процессы, является их время релаксации, которое зависит от структуры поверхности. Для процессов, связанных с медленными поверхностными состояниями, время релаксации может составлять от десятых долей секунды до минут [5]. При изменении электрического поля с частотой около 1 Hz, соответствующей частоте колебаний маятника, происходит релаксация поверхностных состояний. При более высокочастотных изменениях внешнего электрического поля носители заряда не успевают перейти на другие поверхностные состояния и

соответственно уменьшается диссипация, связанная с этими процессами. Так можно объяснить отсутствие механической реакции маятника на высокочастотное поле. Что касается наблюдавшегося изменения добротности маятника после выключения внешнего поля, можно только предположить, что этот эффект связан с электрическими полями, возникающими при адсорбции, однако механизм этих потерь пока неясен. Изучение диссипации энергии механических осцилляторов, вызванной электрическим полем, может дать дополнительную информацию о свойствах поверхности твердого тела.

Авторы благодарят В.Б. Брагинского, С.П. Вятчина и Г.С. Плотникова за полезные обсуждения и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Госкомвуза России (грант № 9508.054) и Национального научного фонда США (грант NPHY-9503642).

Список литературы

- [1] *Braginsky V.B., Mitrofanov V.P., Tokmakov K.V.* // Phys. Lett. A. 1996. V. 218. P. 164–166.
- [2] *Брагинский В.Б., Митрофанов В.П., Панов В.И.* // Системы с малой диссипацией. М.: Наука, 1981. 144 с.
- [3] *Волькенштейн Ф.Ф.* // Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. М.: Наук, 1987. 432 с.
- [4] *Mendez J., Gomez-Herrero J., Pascual J.I.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. N 2. P. 1145–1148.
- [5] *Киселев В.Ф., Крылов О.В.* // Электронные явления в адсорбции и катализе на полупроводниках и диэлектриках. М.: Наука, 1979. 236 с.