Характеристики и применение ультразвуковых двигателей L1B2

Gal Peled, Roman Yasinov и Nir Karasikov
Nanomotion Ltd., Israel
Научный редактор: Kenji Uchino

Принято: 13 Апреля 2016; Одобрено: 25 May 2016; Опубликовано: 1 Июня 2016
Переведено на русский язык ООО "Промышленная метрология" 24 октября 2017, С-Петербург, Комендантский проспект 30 к.1, тел. +7 (812) 438-17-18, 438-17-21, 348-39-62, 348-39-63, info@metrology-spb.ru

Аннотация: Пьезоэлектрические ультразвуковые двигатели обеспечивают важные преимущества для задач, связанных с движением, где требуется высокая скорость и высокая точность. Достижения, полученные в последние десятилетия в области решений для обеспечения движения на основе ультразвуковых двигателей, позволяют создавать завершенные платформы для обеспечения перемещений для полупроводниковой, аэрокосмической и электрооптической отраслей промышленности. Среди различных моделей двигателей, двигатель L1B2 успешно применялся для промышленных задач, обеспечивая высокую точность, эффективное управление и эксплуатационную надежность. В этом документе рассматривается конструкция высокоточных решений для обеспечения перемещения на основе ультразвуковых двигателей L1B2 от базовой конструкции двигателя до полной архитектуры решения, обеспечивающего перемещение, включая усилитель двигателя и контроллер, с учетом используемых материалов и производительности. Производительность демонстрируется с помощью сконструированных сборок для перемещения, которые показывают: быстрое перемещение и установку, окно повторяемости в диапазоне десятков нанометров, срок службы десятки миллионов рабочих циклов и совместимость с чистой комнатой и космической средой. Представлены примеры сборок и модулей для полупроводниковой, аэрокосмической, электрооптической и биомедицинской отраслей. Описанные решения для полупроводниковой и космической отраслей работают от двигателей типа HR, производства компании Nanomotion. На HR-двигатели подается синусоидальное напряжение с рабочей частотой 39,6 кГц и со среднеквадратичным значением около 80 В, что соответствует скорости перемещения рабочей оси примерно 1 мм/сек. HR-двигатели обеспечивают максимальное усилие до 4 Н на приводной элемент (при 5 Вт потребляемой мощности на элемент) и максимальную линейную скорость выше 300 мм/сек (при синусоидальных напряжениях со среднеквадратическим значением до 500 В). Описанные электрооптические модули питаются от небольших двигателей Nanomotion Edge, приводимых в действие напряжением до 11 В переменного тока, обеспечивающих блокирующую силу до 0,32 Н (потребляемая мощность до 0,75 Вт) и максимальную линейную скорость выше 200 мм/с.

Ключевые слова: ультразвуковой двигатель; применения пьезоэлектриков; высокоточное перемещение

Введение

Компактные ультразвуковые двигатели, впервые предложенные в 1970-х годах [1], были разработаны в последующие десятилетия [1,2] в ответ на растущий спрос со стороны полупроводниковой отрасли на точные немагнитные позиционеры; это развитие было поддержано увеличением доступности высококачественной пьезокерамики с более низкой стоимостью. Основным принципом их работы является передача электрической энергии в механический импульс через соединение трением гибкого вибрирующего статора с подвижной частью сборки. В то время как эффективность электромагнитного двигателя зависит от его размера (что делает электромагнитные двигатели размером менее 1 см^3 практически неэффективными в принципе), эффективность пьезоэлектрического двигателя не изменяется с размером, что делает небольшие пьезоэлектрические двигатели наиболее подходящими для использования в небольших механических системах. Преимуществами небольших пьезоэлектрических ультразвуковых двигателей, по сравнению со стандартными электромагнитными двигателями такого же размера и веса, являются: высокая плотность мощности и эффективность (оба параметра не чувствительны к размеру); высокий момент на низких скоростях и малая мощность; немагнитные свойства (что не приводит к генерации электромагнитных шумов и ведет к независимости от внешних электромагнитных полей); тихая работа; отсутствие редуктора (тем самым экономится пространство и уменьшая сложность механизма); быстрый отклик и малое время установления; удержание положения при включенном и выключенном напряжении питания и отсутствие люфта.

В настоящее время эти преимущества позволяют успешно конкурировать со стандартными электромагнитными решениями в тех сегментах высокотехнологичного рынка, где требуется сочетание компактных габаритов, высокой точности позиционирования и большого момента. Предлагаемые изделия эволюционировали от отдельного двигателя до завершенного решения для осуществления движения. Завершенное решение состоит из: двигателя; сборки для создания перемещения; схемы обратной связи с замкнутым контуром; усилителя и контроллера движения с возможностью программирования. Все компоненты завершенного решения настроены на оптимальное перемещение и позиционирование [3].

Стандартная конструкция ультразвукового двигателя использует связь между механическим резонансом вибрирующего пьезокерамического статора и электрическим резонансом цепи возбуждения переменного тока, которая позволяет получить относительно высокую амплитуду вибрации при использовании низких напряжений питания. Этот подход позволяет уменьшить большие усилители напряжения, по существу, до размера батареи. Прогресс в области материалов и компактной электроники позволяет производителям создавать компактные решения для перемещения, специально разработанные для соответствия конкретным требованиям по габаритам, жесткости, профилю сила-скорость, ударной стойкости, температурному диапазону, условиям окружающей среды, дегазации и запылению частицами, делая ультразвуковые двигатели подходящими для применения в полупроводниковом производстве и космической отрасли[4].

Типы конструкций ультразвукового двигателя могут быть подразделены по типам вибрации на стоячую или бегущую волну и в соответствии с типом движения на линейную или поворотную [5,6]. Все конструкции должны учитывать чувствительные аспекты резонансного усилителя высокого напряжения, согласование частоты между управляющей схемой и резонансами статора, коэффициент добротности резонанса, материал и геометрические свойства соответствующей пары трения (для достижения высокой силы с одной стороны и низкого износа с другой). Также должны учитываться и условия окружающей среды, например, - низкая дегазация для применения в космосе.

Среди различных возможных конструкций линейный двигатель стоячей волны, основанный на сочетании первичных продольных и вторичных изгибных режимов [7,8] (двигатель L1B2), хорошо подходит для промышленного производства, сочетая в себе прочную конструкцию с высоким динамичным диапазоном скорости, высокую точностью позиционирования с низким износом и соответствующим долгим сроком службы.

Компания Nanomotion Ltd. (Yokneam, Israel) с 1992 года разрабатывает приводные решения на двигателе L1B2 [9,10]. В этой статье мы рассмотрим структуру и характеристики двигателей L1B2 наряду с рабочими характеристиками высокоточных приводных решений, в которых в течение последнего десятилетия компания Nanomotion использовала ультразвуковые двигатели L1B2. В дополнение к существующей литературе, в которой основное внимание уделяется предмету разработки базовых элементов и, как правило, не рассматриваются более широкие аспекты системы (например, [7,8,11-13]), в настоящем документе рассматривается полное приводное решение на двигателе L1B2. Далее рассматриваются: пьезокерамический элемент, конструкция двигателя, усилитель двигателя, управление перемещением, различные аспекты применения материалов и эффект тепловыделения, а также точность позиционирования для обеспечения требуемой конечным пользователем производительности (также в сложных условиях окружающей среды). Предлагается начать с рассмотрения общей конструкции приводного решения на двигателе L1B2 (Раздел 2), далее рассматриваются эксплуатационные условия (Раздел 3), точность позиционирования (Раздел 4) и в завершении рассматриваются примеры существующих промышленных решений (Раздел 5). Обсуждаемые решения рассматриваются на примере высокотехнологических задач из космической, полупроводниковой, биомедицинской и электрооптической отраслей промышленности.

2. Общая конструкция приводного решения

Полная архитектура приводного решения состоит из ультразвукового двигателя, усилителя двигателя, контроллера с обратной связью от датчика положения и сборки, реализующей перемещение. Схематическое изображение показано на Рисунке 1. Контроллер использует предварительно запрограммированный алгоритм управления для выполнения предписанного профиля движения (сборки), подавая требуемый уровень управляющего напряжения на усилитель двигателя, который, в свою очередь, подает нужное напряжение переменного тока на двигатель, перемещающий сборку. Положение сборки непрерывно корректируется в соответствии с сигналом обратной связи по положению. Сигнал обратной связи по положению подается на контроллер от датчика положения и позволяет минимизировать погрешность

положения между заданным и фактическим положениями. Таким образом, величина ошибки положения зависит от разрешения движения двигателя, динамического отклика двигателя, разрешения датчика и пропускной способности контроллера.

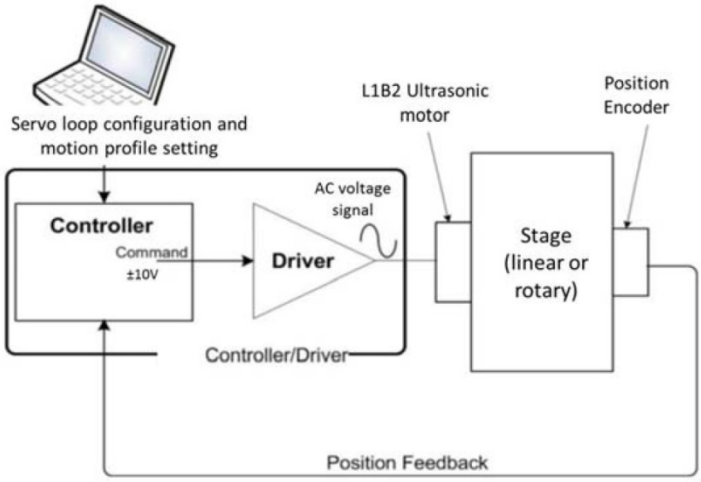


Рисунок 1. Схематическое изображение архитектуры высокоточного приводного решения на основе ультразвукового двигателя L1B2.

2.1. Двигатель L1B2

В общей конструкции двигателя учитывается соотношение длины к ширине прямоугольного пьезоэлектрического стержня, поляризованного по толщине. Возбуждается одновременная вибрация первых продольных и вторых изгибных резонансов (они оба зависят от длины стержня) (см. Рисунок 2a). Вибрация возбуждается в средней плоскости длина-ширина (плоскость, перпендикулярная направлению толщины), с помощью пьезоэлектрического коэффициента d31.

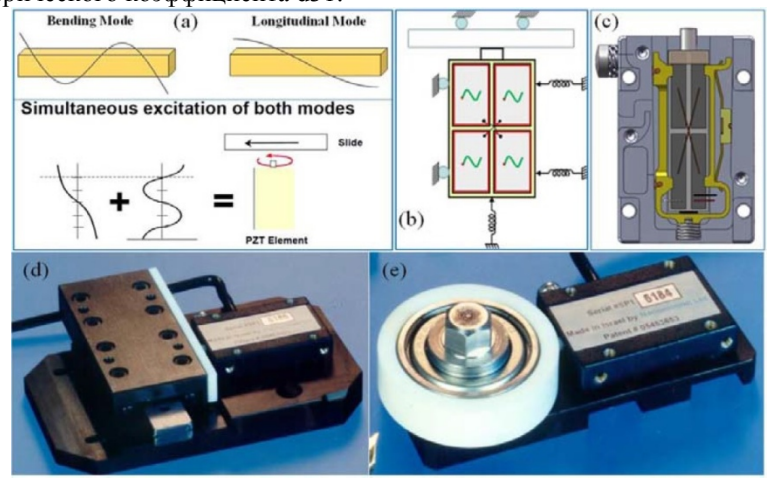


Рисунок 2. Основная конструкция пьезоэлектрического ультразвукового двигателя L1B2: (a) Схематическое представление одновременного возбуждения продольного и изгибного режимов. (b) Схематическое представление предварительной нагрузки пьезоэлектрического элемента на движущуюся сборку; (c) Пример чертежа двигателя Nanomotion типа HR1, основанного на одном пьезоэлектрическом элементе L1B2 (Nanomotion HR типа), реализующем схему предварительной нагрузки элемента, которая схематически показана на (b); (d) Изображение линейной сборки, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1; (e) Изображение поворотной сборки, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1.

Одновременная вибрация может быть произведена двумя способами. Первый способ заключается в выборочном возбуждении части элемента, с использованием одного или двух источников возбуждения [8-13]. Второй способ заключается в адаптации геометрии элемента для создания совмещенного режима [7]. В

этой статье мы рассматриваем только первый метод, так как он распространен в промышленных приложениях.

Два режима возбуждаются вместе посредством приложения переменного электрического поля по толщине стержня, с помощью нескольких прямоугольных электродов, нанесенных на две самые большие поверхности стержня: четыре прямоугольных электрода (одного размера) на одной стороне и один большой электрод - на другой. Подавая напряжение между нижним электродом и одной из пар диагонально расположенных электродов на верхней поверхности (так возбуждается только половина пьезоэлектрического объема), возбуждается как изгиб, так и удлинение в средней плоскости стержня. Выбор надлежащего отношения длины к ширине, адаптированного к подходящей частоте поля возбуждения, позволяет получить неизменную разность фаз между режимами расширения и изгиба (при резонансной частоте). В результате каждая из наименьших граней балки описывает эллиптическую траекторию (в средней плоскости балки). Для создания движения вибрационный элемент предварительно прижимается к подвижной части сборки (линейной или поворотной) с использованием задних и боковых пружин, которые подбираются таким образом, чтобы обеспечивать соответственно требуемое усилие перемещения и боковую жесткость (Рис. 2b). Пример такой конструкции показан на Рисунке 2c. Выбор одной или другой пары диагонально расположенных электродов на верхней поверхности определяет направление эллиптической траектории стержня и, следовательно, направление движения сборки. Таким образом, двунаправленное движение сборки может быть получено из однофазного электрического привода путем простого изменения квадрантов возбуждения.

Чтобы предотвратить износ пьезоэлектрического элемента во время работы двигателя, предварительная нагрузка выполняется с помощью износостойкого твердого керамического наконечника, который крепится в центре на той поверхности балки, которая обращена к сборке (Рис. 2b). Наконечник также может быть прикреплен в других местах на элементе; такие конструкции менее распространены и не рассматриваются в этой статье (например, см. [11]). Со стороны сборки прикреплена дополнительная износостойкая лента. Тип движения - линейный или вращательный - определяется путем выбора, соответственно, линейной или поворотной сборки (Рис. 2d, e).

Зависимость сила-скорость сборки определяется амплитудой и частотой эллиптического движения наконечника, силами преднатяжения элемента и трибологическими свойствами пары трения наконечник - лента. Амплитуда движения наконечника пропорциональна произведению амплитуды электрического поля, пьезоэлектрического коэффициента d31, длины балки и коэффициента добротности механического резонанса. Обратите внимание, что добротность резонанса намного меньше, чем у свободного тела из-за затухания, вызванного предварительной нагрузкой и из-за потерь энергии при трении двигателя. Резонансная частота работы двигателя определяется геометрией, плотностью и упругими свойствами пьезоэлектрического элемента.

Электрическое поле, управляющее пьезоэлектрическим элементом (двигателем), создается через резонансный контур, который преобразует низковольтное входное напряжение постоянного тока в высоковольтное выходное напряжение переменного тока, подаваемое на элемент.

Таким образом, по сравнению со стандартным пьезоэлектрическим приводом, управляемым постоянным напряжением, смещение, полученное на наконечнике элемента ультразвукового двигателя, работающее в резонансе, определяется двумя коэффициентами добротности: геометрическим механическим резонансом и электрическим резонансом усилительно-преобразующего устройства. Обычно смещения находятся в диапазоне микрометров, что позволяет снизить входные напряжения постоянного тока до уровня нескольких десятков вольт. Использование многослойных элементов в двигателях EDGE и EDGE-4X [14] позволяет дополнительно снизить требуемые входные напряжения постоянного тока до уровня в несколько вольт, что позволяет использовать батареи в качестве источника питания.

2.2. Усилитель двигателя

Двигатель управляется синусоидальным напряжением переменного тока, получаемым с использованием резонансного преобразователя напряжения. Резонансный преобразователь напряжения – это усилительная цепь, которая использует напряжение, чтобы привести элемент в точку резонанса на фиксированной частоте. Затем это напряжение используется для изменения амплитуды на наконечнике пьезодвигателя, для преобразования его в скорость. Стандартный усилитель двигателя построен из нескольких последовательных блоков (см. Рис. 3a): (1) DC-преобразователь, питающийся от внешнего источника постоянного тока; (2) цепь усилителя, которая производит ШИМ-сигнал, и (3) LC-резонансный контур (включающий элемент двигателя в качестве конденсатора), который генерирует на элементе

итоговое синусоидальное напряжение. Для управления направлением перемещения могут использоваться два канала усилителя или один канал усилителя с переключателем направления. Управление осуществляется путем использования различных вариантов подключения к диагональным электродам на верхней поверхности элемента (см. Рис. 3b).

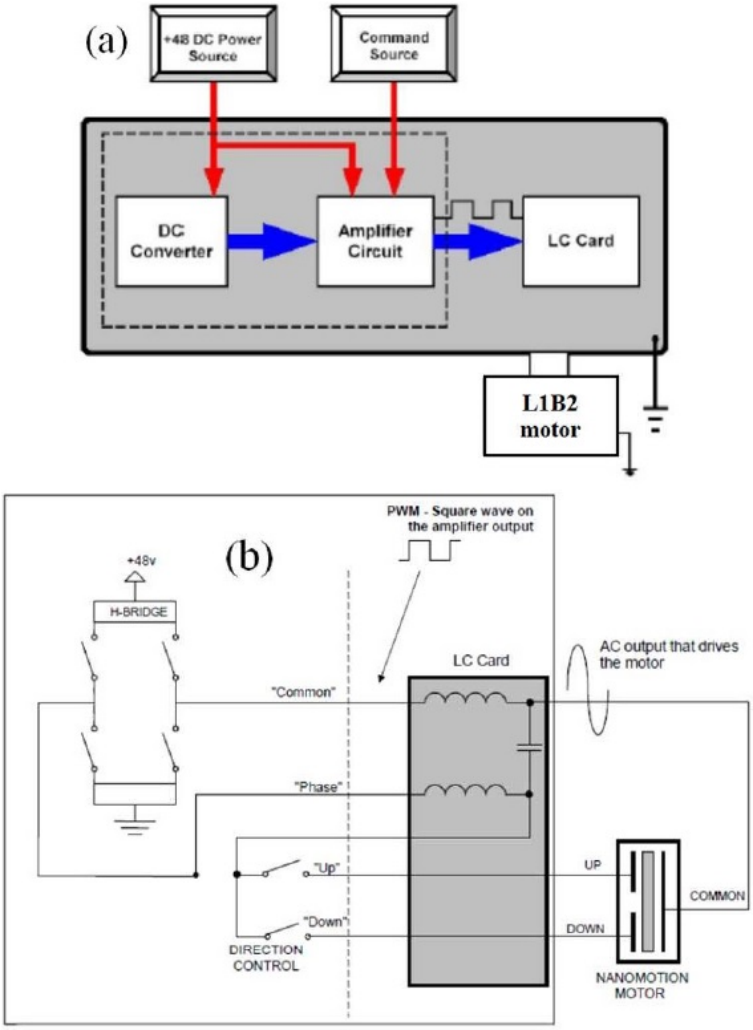


Рисунок 3. Схематичное представление конструкции усилительно-преобразовательного устройства ультразвукового двигателя (драйвер Nanomotion AB1A [15]): (a) основные блоки усилительно-преобразовательного устройства; (b) Схема выходного каскада с внутренней LC-картой (один канал с переключателем направления).

Учитывая статическое трение в сборке, требуется приложить определенный минимальный уровень среднеквадратического напряжения переменного тока, чтобы начать движение в сборке (среднеквадратичное значение напряжения двигателя/усилителя в мертвой зоне), после чего максимальная достижимая скорость сборки будет линейно увеличиваться при увеличении среднеквадратического напряжения двигателя.

Приведенная выше конфигурация усилительно-преобразовательного устройства демонстрирует высокую эффективность преобразования низкого входного DC-напряжения в высоковольтное AC-напряжение, что позволяет использовать усилительно-преобразовательное устройство малых габаритов для питания большого количества ультразвуковых элементов, подключенных параллельно; либо в одном двигателе, либо в нескольких двигателях, соединенных параллельно. Это особенно полезно для крупногабаритных решений для перемещений, подобных тем, которые используются в полупроводниковой промышленности.

2.3. Управление движением

Контроллер подает управляющее напряжение, обычно в диапазоне от -10 В до +10 В, в усилительную цепь усилительно-преобразующего устройства. Усилительно-преобразующее устройство преобразует управляющее напряжение в высоковольтный сигнал переменного тока, подаваемый на двигатель; таким образом, неизменное управляющее напряжение контроллера ведет к неизменному среднеквадратическому значению напряжения двигателя. Минимальное среднеквадратическое значение напряжения усилителя, необходимое для обеспечения движения (напряжение усилителя в мертвой зоне) соответственно преобразуется в минимальное значение команды контроллера, необходимое для создания движения (значение команды контроллера мертвой зоны). Скорость в зависимости от времени (для изначально неработающей сборки), как реакция на ступенчатую функцию постоянной команды контроллера (по уровню выше значения команды контроллера мертвой зоны), - может быть описана дифференциальным уравнением первого порядка по скорости. Решение приводит к преобразованию в максимальное значение скорости как в функцию от времени (для соответствующего командного уровня) (см. Рис. 4) и линейную обратную зависимость между скоростью сборки и доступной силой (см. Раздел 3.3 ниже). Следовательно, для заданного постоянного командного уровня (выше мертвой зоны) сборка с перемещаемой массой $\boldsymbol{m}$ может развивать максимальную силу (для этого командного уровня) $\boldsymbol{F_{max}^{C}}$ при нулевой скорости или достигать максимальной скорости $\boldsymbol{V_{max}^{C}}$ при нулевой силе. Значения максимальной силы и максимальной скорости возрастают с увеличением командного уровня до значений максимальной движущей силы $\boldsymbol{F_{max}}$, и абсолютной максимальной скорости $\boldsymbol{V_{max}}$ при максимальной команде 10 В. Зависимость скорости от времени $\boldsymbol{V(t)}$ может быть хорошо описана соотношением:

$$\boldsymbol{V(t) = V_{max}^{C} \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}$$

Где $\boldsymbol{\tau = \left(\frac{m \times V_{max}}{F_{max}}\right)}$ постоянная времени, связанная с динамикой двигателя. Значения $\boldsymbol{V_{max}}$ и $\boldsymbol{F_{max}}$ определяются пьезоэлектрическими свойствами, коэффициентом добротности резонансного контура и амплитудой и частотой сигнала, подаваемого на двигатель. $\boldsymbol{F_{max}}$ также зависит от: (1) значения нормальной силы в точке контакта между твердым керамическим наконечником и керамической полоской, расположенной на подвижной части сборки привода, которая в основном определяется предварительной нагрузкой, приложенной от задней пружины; (2) количества элементов L1B2, работающих параллельно (в одном двигателе или нескольких двигателях, работающих в одной и той же оси движения). Пример динамических характеристик сборки в виде отклика на ступенчатую функцию постоянной команды контроллера (для 2В, 3В, 4В, 5В, 6В, 7В) показан на Рисунке 4. На Рисунке 4 показан отклик сборки для линейного перемещения с перемещаемой массой весом 235 г, приводимой в движение двигателем Nanomotion HR2, содержащим два приводных элемента L1B2 HR-типа (каждый, из которых обеспечивает движущую силу ($\boldsymbol{F_{max}}$) 4 Н). Сборка приводится в действие усилительно-преобразующим устройством Nanomotion AB1A (см. Рис. 3). На Рисунке 5а показан пример зависимости $\boldsymbol{V_{max}^{C}}$ от уровня управляющего напряжения для двигателей Nanomotion HR.

Компания Nanomotion также разработала собственное усилительно-преобразовательное устройство (усилительно-преобразовательное устройство AB5), которое уменьшает минимальное напряжения двигателя (и, следовательно, минимальное управляющее напряжение), требуемое для начала движения сборки [16] и обеспечивает линейную зависимость между командой контроллера и скоростью сборки (см. Рис. 5b).

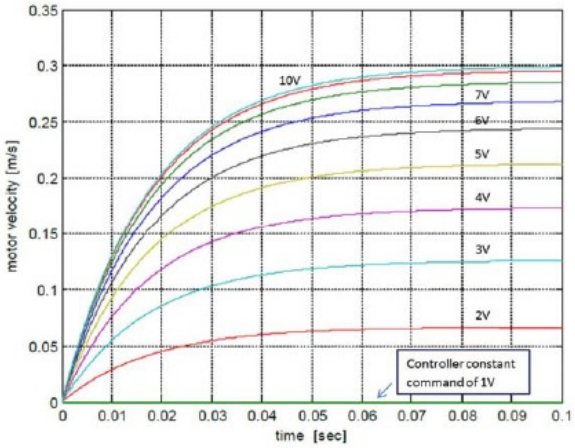


Рисунок 4. Скорость сборки в зависимости времени для нескольких значений постоянной (для 2В, 3В, 4В, 5В, 6В, 7В) команды контроллера, приложенной к усилительно-преобразовательному устройству; двигатель Nanomotion HR2, перемещающий массу 235 г в горизонтальной сборке для линейного перемещения. Используется усилительно-преобразовательное устройство Nanomotion AB1A.

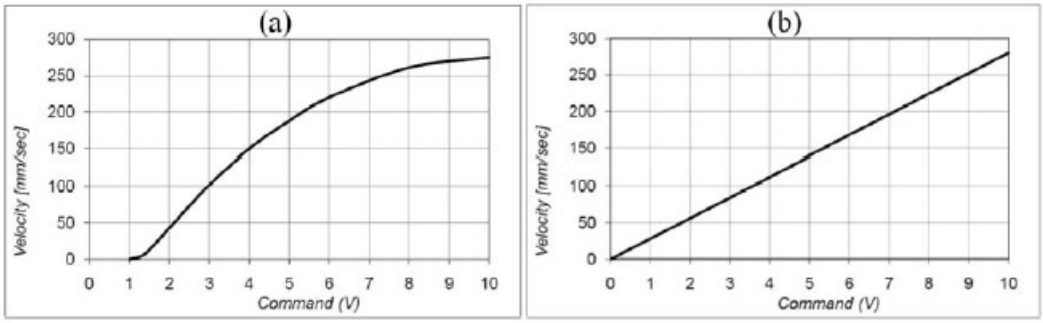


Рисунок 5. Максимальная скорость линейной сборки в зависимости от управляющего напряжения контроллера, подаваемого на усилительно-преобразующее устройство. Значения приведены для двигателей L1B2 (Nanomotion HR-Type [17]), управляемых усилительно-преобразовательными устройствами Nanomotion AB1A (a) и AB5 (b). Двигатели работают в горизонтальной плоскости, при комнатной температуре и при низком рабочем цикле (<10%). Механический интерфейс двигателя реализуется через керамическую ленту, установленную на высококачественную направляющую с перекрестными роликами.

Обычно управление двигателем с замкнутым контуром выполняется с использованием высокоскоростного PIV-контроллера (P=Proportional Gain, I=Integral Gain, D=Derivative Gain и V=Velocity Gain) с нелинейным механизмом. На Рисунке 6 приведен пример в виде блок-схемы серво-петли контроллера (Nanomotion XCD [18]), использующей следующие механизмы для повышения точности движения сборки: (1) Механизм подачи напряжения смещения - обеспечивает стартовое значение первоначальной команды для преодоления присущей мертвой зоны; (2) Механизм упреждающей установки нуля - уменьшает время установления сборки, отключая контур регулирования скорости (обычно от 30 до 50 мкм до целевого положения) и тем самым уменьшая скорость до того уровня, с которого сборка приближается к своему целевому положению и устраняет перерегулирование; (3) Механизм мертвой зоны - использует внутреннее трение двигателя для предотвращения дрожания и улучшения времени установления. Это достигается путем определения двух диапазонов позиций вокруг целевой позиции. Меньший диапазон (DZMIN) определяет небольшой диапазон положения вокруг цели. Когда двигатель входит в этот диапазон, контроллер передает команду на ноль, но продолжает следить за положением. Петля управления перезапускается для корректировки только в том случае, если позиция выходит за пределы предопределенного (желаемого) более широкого диапазона (требуемая точность) вокруг цели (DZMAX).

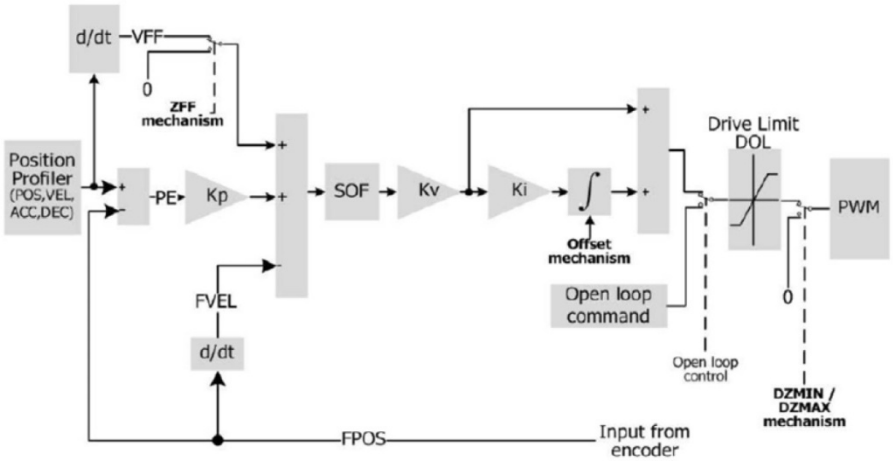


Рисунок 6. Блок-схема сервомеханизма контроллера движения (контроллер Nanomotion XCD [18]).

3. Условия эксплуатации

3.1. Диапазон рабочих температур

Поскольку многие пьезоэлектрические материалы, пригодные для использования в пьезоэлектрических двигателях с высокой мощностью, имеют температуру Кюри выше 300 °C, то сама температура Кюри обычно не служит тепловым ограничением для работы двигателя (с точки зрения чисто пьезоэлектрических свойств, но на практике двигатель не должен работать при температуре выше половины температуры Кюри (в градусах Цельсия), чтобы изменение свойств пьезоэлемента было минимальным). Что касается пределов работы, как при высоких, так и низких температурах, необходимо учитывать: (1) изменения свойств материала пьезоэлектрического элемента, которые могут влиять на резонансную частоту, а также величину пьезоэлектрического коэффициента; (2) несоответствие теплового расширения между различными частями двигателя и, как следствие, возникающее механическое напряжение между ними; (3) изменение механических свойств компонентов двигателя, таких как температура перехода в стеклообразное состояние клеевых соединений и инженерных пластмасс и температуры перехода в жидкое состояние паяных соединений. В настоящее время доступны двигатели L1B2, работающие в диапазоне температур от -20 °C до 50 °C (двигатели Nanomotion HR), а с использованием специальных материалов этот диапазон может быть увеличен до (и более) от -55 ° C до 80 ° C (двигатели Nanomotion Edge и Edge4X).

3.2. Работа в вакууме

Пьезоэлектрические ультразвуковые двигатели, благодаря своим низким характеристикам дегазации пьезокерамики, хорошо подходят для работы в высоком вакууме. В конструкции вакуумного двигателя должна рассчитываться вакуумная дегазация всех частей двигателя, подверженных воздействию вакуума. Обычно используются металлы с низкой дегазацией и технические пластмассы, а также клеи, пригодные для работы в вакууме (например, см. [19]). В двигателях, предназначенных для работы в высоком вакууме, как правило, хорошей практикой является рекомендация ограничивать использование пластмасс и клеящих веществ до минимума. В Таблице 1 показан пример разделения по весу на типы материалов, применяемых в двигателе L1B2, предназначенном для высокого вакуума (Nanomotion HR4-1-U-1.5 UHV). Обратите внимание, что общий вес клеящих веществ и эластомеров составляет всего 0,14% от общей массы двигателя. Для дальнейшего повышения совместимости с вакуумом следует использовать специальные методы очистки и вакуумного обжига.

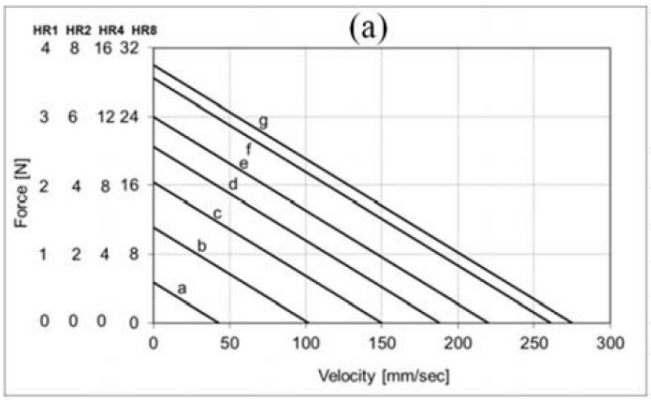
Таблица 1. Пример распределения материалов по весу в двигателе, предназначенном для работы в высоком вакууме L1B2 (Nanomotion HR4-1-U-1.5 UHV).

Материал/Часть двигателя	Вес в процентах от двигателя
Низкогазящие металлы	49,57
Пластик	2,71

Провода (изоляция и медные жилы)	18,14
Связующие материалы	0,06
Упругие полимеры	0,08
Керамика	29,44

3.3. Диапазон режимов для безопасной эксплуатации

Эргономичная основа решения L1B2 позволяет объединить несколько элементов L1B2 в одном двигателе, чтобы увеличить движущую силу и жесткость двигателя в направлении движения. Двигатели типа Nanomotion HR используют это свойство, обеспечивая блокирующую силу величиной 4 Н на один приводной элемент L1B2 HR (двигатель HRl), 8 Н для двух элементов (двигатель HR2), 16 Н для четырех (двигатель HR4) и 32 N для восьми (двигатель HR8) [17]. Диапазон режимов для безопасной эксплуатации описывается в следующем параграфе и показан на Рисунке 7.



(b)

Curve	AB1A, AB2, AB4					
	Air 25°C		Air 50°C		Vacuum	
	Duty Cycle [%]	Maximal Continuous Operation time [sec]	Duty Cycle [%]	Maximal Continuous Operation time [sec]	Duty Cycle [%]	Maximal Continuous Operation time [sec]
a	100	∞	100	∞	100	∞
b	100	∞	100	∞	44	184
c	100	∞	92	137	26	107
d	100	∞	62	93	17	72
e	78	87	47	70	13	55
f	56	62	33	50	9	39
g	50	56	30	45	8	35

Рисунок 7. Диапазон режимов для безопасной эксплуатации двигателей L1B2 Nanomotion серии HR, приводимых в движение усилительно-преобразовательным устройством AB1A [17]: (a) Графики зависимости Сила-Скорость двигателей Nanomotion HR; (b) максимальный рабочий цикл для работы в воздухе и вакууме; для работы при различных комбинациях силы и скорости, расположенных под каждым из графиков зависимости Сила-Скорость, показанных на рисунке (a).

Продолжительность непрерывной работы двигателя ограничена необходимостью получения баланса скорости генерации тепла элементом при его работе и скорости рассеяния тепла в окружающую среду; скорость рассеяния зависит от температуры элемента, температуры окружающей среды и теплопроводности компонентов двигателя и сборки. Результирующая температура работы двигателя не должна превышать максимально допустимую температуру материалов компонентов двигателя. При приближении к таким граничным значениям (с учетом определенного коэффициента безопасности), работа двигателя должна быть остановлена, и двигателю нужно дать время, чтобы остыть. В результате для каждого набора условий работы, состоящих из комбинации силы, скорости и типа окружающей среды, существует максимальный рабочий цикл, который определяется как максимальный процент рабочего времени из общего времени (время работы плюс время простоя). Пример максимального допустимого рабочего цикла для двигателей типа Nanomotion HR, приводимых в действие усилительно-преобразовательным устройством AB1A, показан на Рисунке 7b: для воздушной среды при 25 °C и 50 °C и для высокого вакуума при 25 °C. Дополнительные рабочие условия показаны на Рисунке 7a.

3.4. Рассмотрение трения и износа

Использование передачи с трением в двигателе L1B2 предъявляет строгие требования к свойствам материала пары трения. Для обеспечения высокой точности позиционирования с быстрым перемещением и успокоением требуется высокая жесткость, как для керамического наконечника, так и для керамической полоски. Коэффициент трения должен быть достаточно высоким, чтобы обеспечить силы, необходимые для предполагаемой области применения. Он должен оставаться постоянным, с небольшим допуском, на протяжении всего срока в заданной области применения, чтобы способствовать плавной работе двигателя.

Скорость износа, как наконечника, так и полоски должна оставаться низкой (до незначительной) на протяжении всего срока службы.

Сочетание вышеуказанных требований не является простым и, как правило, требует исследований и разработок трибологических аспектов контакта керамики наконечник-полоска. Например, использование смазочных материалов для получения низкого износа обычно ограничено требованием наличия определенного коэффициента трения. Это увеличивает важность параметров порошкового материала для предотвращения износа. На значение коэффициента трения также может влиять химия окружающей среды, в которой работает двигатель (например: обычные условия, высокий вакуум, камера вакуумного напыления и т. д.).

Исходя из вышесказанного, оптимизация работы двигателя L1B2 должна поддерживаться базой трибологических знаний, собранной с помощью специальных исследований и разработок, ориентированных на различные аспекты материалов и условий работы для предполагаемой области применения. Для обеспечения надежности каждая выбранная пара трения должна быть проверена работой двигателя в условиях предполагаемого применения. В компании Nanomotion собран опыт сотен месяцев работы двигателей, с оптимизацией пары трения, которые используются в различных условиях окружающей среды и условиях эксплуатации. Подходящие материалы обычно выбирают из семейства твердой керамики.

4. Точность позиционирования

Рассмотрим линейную сборку, связанную с двигателем L1B2, как показано на Рисунке 2b. Подвижная часть сборки соединена с неподвижным корпусом двигателя через упругие компоненты, поддерживающие элементы L1B2 (см., например, Рисунок 2c). Таким образом, масса подвижной части сборки эффективно действует на пружину как масса вдоль направления движения с соответствующей резонансной частотой, пропорциональной квадрату эффективной жесткости элементов корпуса. С одной стороны, эта установка создает фильтр нижних частот, который для стандартной сборки не позволяет использовать частоты сборки в ультразвуковом диапазоне. Поэтому ошибка положения во время движения напрямую не зависит только от ультразвуковой вибрации. С другой стороны, эта резонансная частота устанавливает верхний предел динамических характеристик сборки. В результате высокая жесткость элемента корпуса (эффективная жесткость двигателя в направлении движения) является важным фактором в достижении динамики быстрого перемещения и установления, с высокой точностью позиционирования.

Точность позиционирования сборок, приводимых в действие ультразвуковыми двигателями L1B2 посредством управления замкнутым контуром, зависит от нескольких факторов: эффективной жесткости двигателя/двигателей в направлении движения; коэффициентов усиления и частоты, на которой реализуется алгоритм управления замкнутым контуром; позиционного разрешения механизма обратной связи и амплитуды ультразвуковых колебаний. На следующем примере мы покажем, что для стандартной 0,5-килограммовой сборки уже доступна точность в несколько десятков нанометров.

В дополнение к движению сборки, генерируемому ультразвуковыми колебаниями (движение в режиме переменного тока), элементы L1B2 могут использоваться в режиме привода, где после выключения режима ультразвукового резонанса, конечное положение достигается и удерживается приложенным постоянным напряжением с замкнутым контуром, которое подается через элемент, вызывая его изгиб (движение в режиме постоянного тока), тем самым перемещая сборку в субмикронном диапазоне [20]. Этот режим позволяет достичь нанометрового разрешения, обеспечивая соответствующее разрешение с обратной связью по положению.

На Рисунках 8 и 9 показаны примеры движения линейной сборки с помощью двигателя L1B2 - двигателя Nanomotion HR8, с жесткостью двигателя 3,5 Н/мкм. На Рисунке 8 показан пример высокоточного позиционирования в АС-режиме (переменный ток) для 0,5 кг сборки. Система выполняет повторяющиеся движения вперед-назад на расстояние 10 мм, с повторяемостью в диапазоне 50 нм и со временем установления 90 милисекунд. На Рисунке 9 показан пример приведения в действие горизонтальной сборки в DC-режиме (постоянный ток), с перемещаемой массой 2 кг, в пределах максимального диапазона срабатывания 600 нм (Рисунок 9a), а также пример работы сборки с шагом 4 нм (Рисунок 9b) с удержанием положения с точностью до 1 нм до и после осуществления перемещения на 1 шаг (4 нм). Измерения проводились на очень простом пассивном столе подавления вибрации, вибрации окружающей среды подавлялись двигателем Nanomotion с высоким демпфированием.

Работа двигателя L1B2 с помощью приводного кольца, оснащенного датчиком с высоким разрешением, позволяет построить ось вращения с очень высокой угловой точностью. Пример показан на Рисунке 10, где детализируется погрешность положения вращающейся сборки NM FBR 60 (приводимой в действие двумя

вакуумными двигателями Nanomotion HR2) для более, чем 42 000 шагов в диапазоне углового хода 90 °. Стандартная ошибка положения, измеряемая через 10 секунд после окончания движения, составляет менее 1 мкРад.

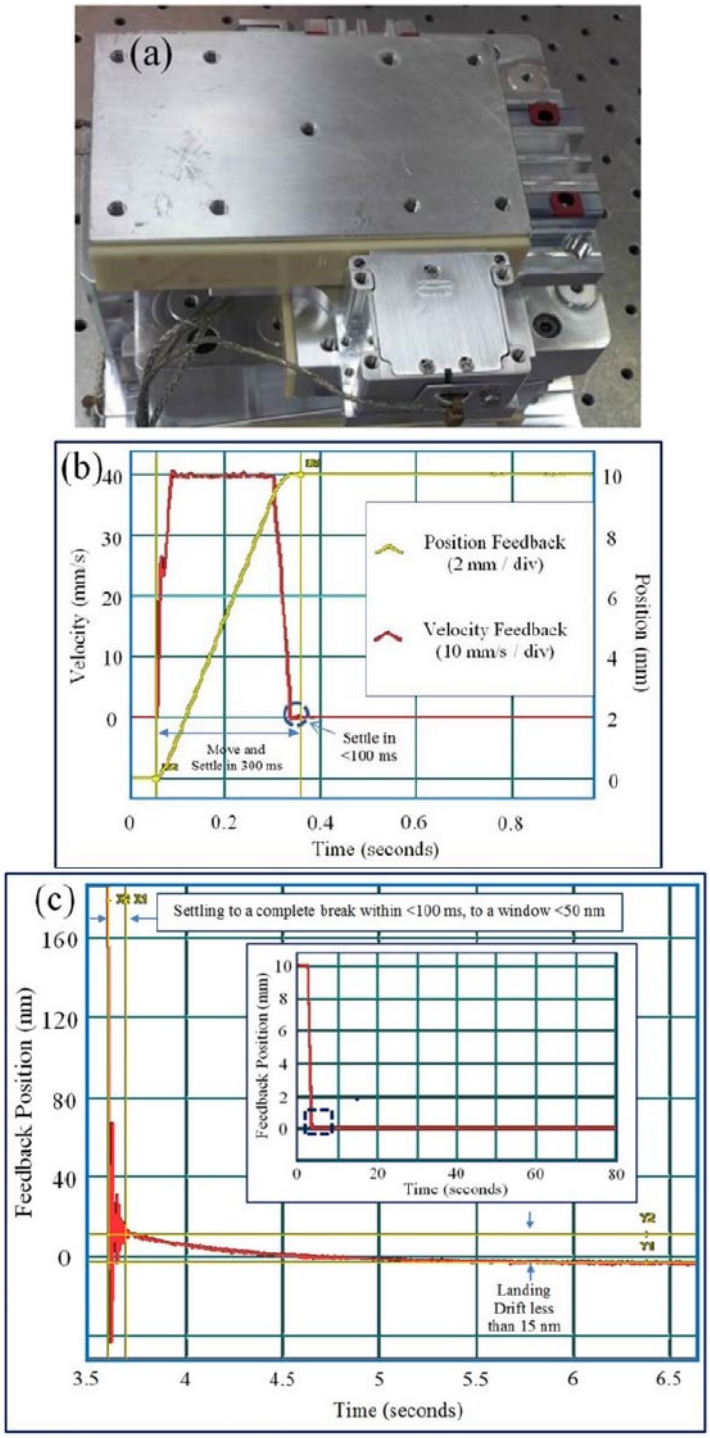


Рисунок 8. Продолжение далее

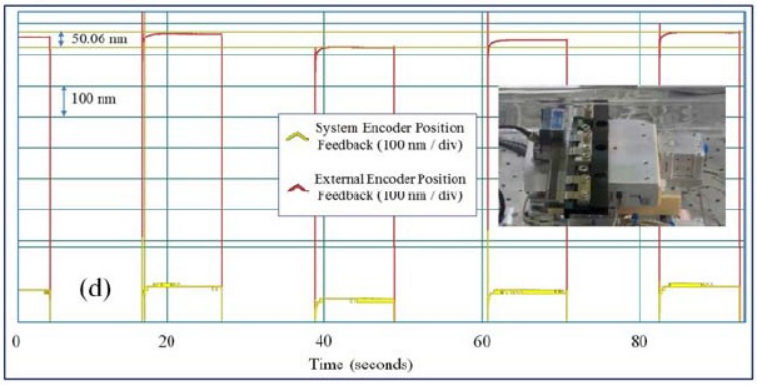


Рисунок 8. Пример высокоточного позиционирования с высокой скоростью, с использованием линейной сборки с двигателем L1B2 с перемещаемым весом 0,5 кг. Показана производительность сборки NM FB75-100 -HR8, приводимой в действие двигателем в вакуумном исполнении NM HR8-V (содержащим восемь элементов L1B2) и снабженном с помощью оптического датчика обратной связью по положению (разрешение датчика составляет 10 нм). Графики красного цвета получаются с помощью внешнего опорного датчика с разрешением 0,1 нм. (a) Изображение сборки FB75-100-HR8; (b) Позиция и скорость сборки в зависимости от времени, показывающая стандартное перемещение с шагом 10 мм, осуществленное за 300 мс; (c) Обратная связь по положению во время процесса остановки, показывающая (окончательную остановку) установку в диапазоне до 50 нм от заданного значения за 100 мс, за которым следует установочный дрейф до 15 нм в течение следующих 3 с; (d) Положение как функция времени во время последовательного движения вперед и назад на расстояние 10 мм. График фокусируется вокруг установочного положения на одной из двух оконечных точек движения, с установлением в окне повторяемости менее 50 нм.

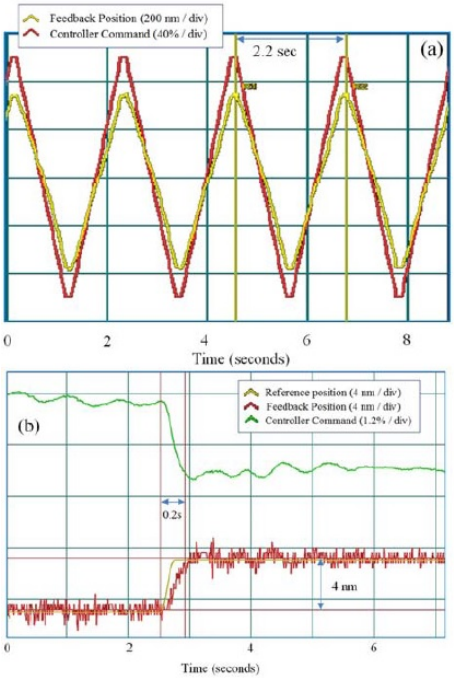


Рисунок 9. Использование двигателя L1B2 в режиме привода (DC). (a) Движение линейной сборки с перемещаемым весом 2 кг, приводимой в движение двигателем NM HR8 (содержащим восемь элементов L1B2), работающих в режиме постоянного тока: положение и уровень команды контроллера в зависимости от времени; (b) Пример позиционирования с шагом 4 нм, выполненного на сборке Nanomotion FB75-100-HR8, работающей в режиме постоянного тока, оборудованной двигателем NM HR8. Разрешение датчика положения с обратной связью составляет 0,4 нм.

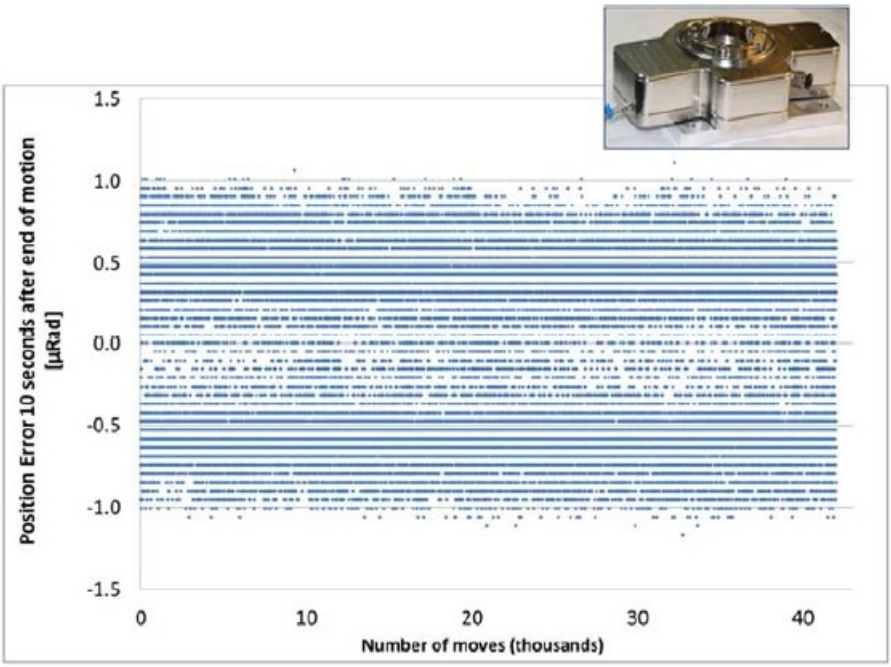


Рисунок 10. Точность позиционирования поворотной сборки (сборка Nanomotion FBR60, показанная на вставке), работающая от двух двигателей L1B2 (вакуумные двигатели Nanomotion HR2). Сборка работала последовательно с шагом 90 ° (каждые четыре шага завершали цикл вращения). Ошибка углового положения для каждого шага была записана через 10 с после окончания движения и представлена точкой на этом графике, которая показывает зарегистрированные ошибки положения для 42 000 шагов.

5. Примеры решений для осуществления перемещения

5.1. Вакуумные сборки для космических применений

Использование двигателей L1B2 имеет ряд преимуществ для применения в космосе. Наличие прямого привода позволяет двигателям L1B2 обеспечивать высокую силу/момент на низких скоростях, устраняя необходимость в редукторе (который обычно используется совместно с двигателями постоянного тока для получения высокого момента на низких скоростях), уменьшая расчетный вес, высвобождая объем и устраняя люфт. Потребление нулевой мощности при удержании позиции снижает требования к питанию, в то время как низкая дегазация снижает риск загрязнения.

На Рисунке 11 показан пример миниатюрной сканирующей сборки на основе L1B2 для использования в условиях низкой околоземной орбиты. Двигатель представляет собой вакуумный двигатель HR2, работающий и управляемый от усилителя со встроенным контроллером XCD [21]. Двигатель приводит в действие линейную сборку с перемещаемым весом 230 г. Система была протестирована в высоком вакууме (10^{-6} Торр) при непрерывном выполнении периодического профиля движения с частотой 8 Гц (Рисунок 11b). Профиль представляет собой работу с интенсивным рабочим циклом, включая ускорения 2 м/с^2. Средняя погрешность положения во время фазы постоянной скорости движения оставалась ниже 4 мкм в течение 50 миллионов циклов работы в вакууме (Рисунок 11c). Этот тест имитирует трехлетнюю работу в условиях космического пространства в высоком вакууме.

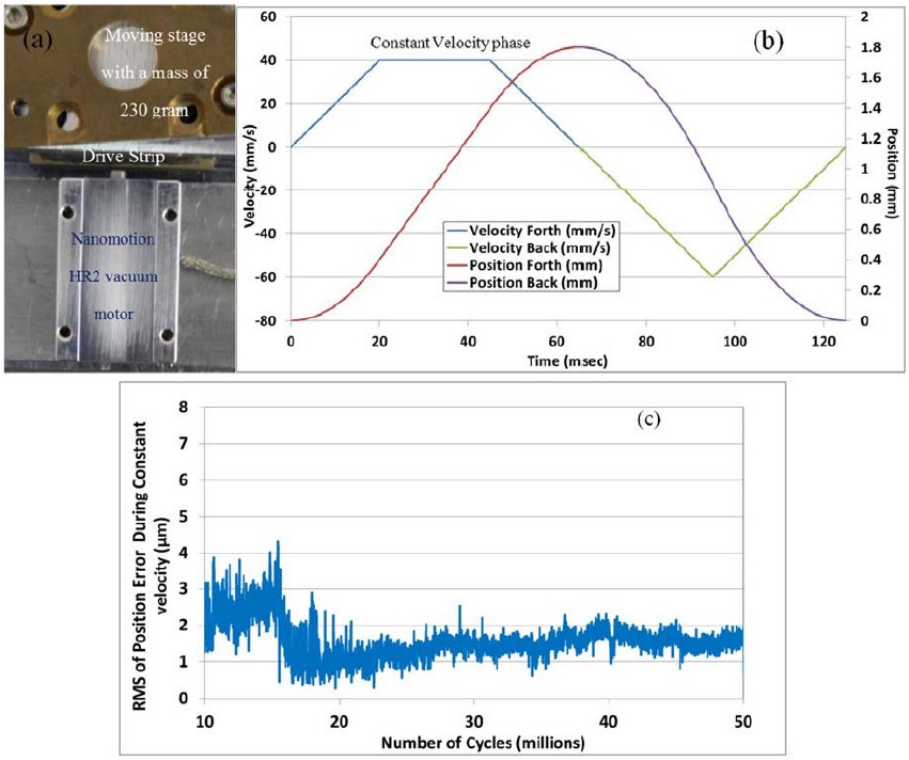


Рисунок 11. Работа сканирующей сборки в вакууме: (a) Изображение установки, включающей двигатель HR2 в вакуумном исполнении и линейную сборку с перемещаемой массой 230 г; (b) Профиль движения в течение одного цикла сканирования; (c) Среднеквадратическая ошибка положения, как функция количества выполненных циклов сканирования.

Чтобы обеспечить незначительную молекулярную дегазацию, все компоненты двигателя и сборки должны пройти строгие процедуры вакуумной очистки. В качестве примера на Рисунке 12 представлен анализ остаточного газа на неактивной сборке Nanomotion FBR60-U в высоком вакууме (с активной накачкой). Сканирование проводили на очищенной сборке через 60 ч после начала вакуумной прокачки. Сравнение полученного спектра с изначальным базовым спектром камеры не указывает на наличие каких-либо линий парциального давления газа, имеющих парциальное давление выше парциального давления тестовой чувствительности (5E^-11 Торр), что может быть связано с дегазацией сборки.

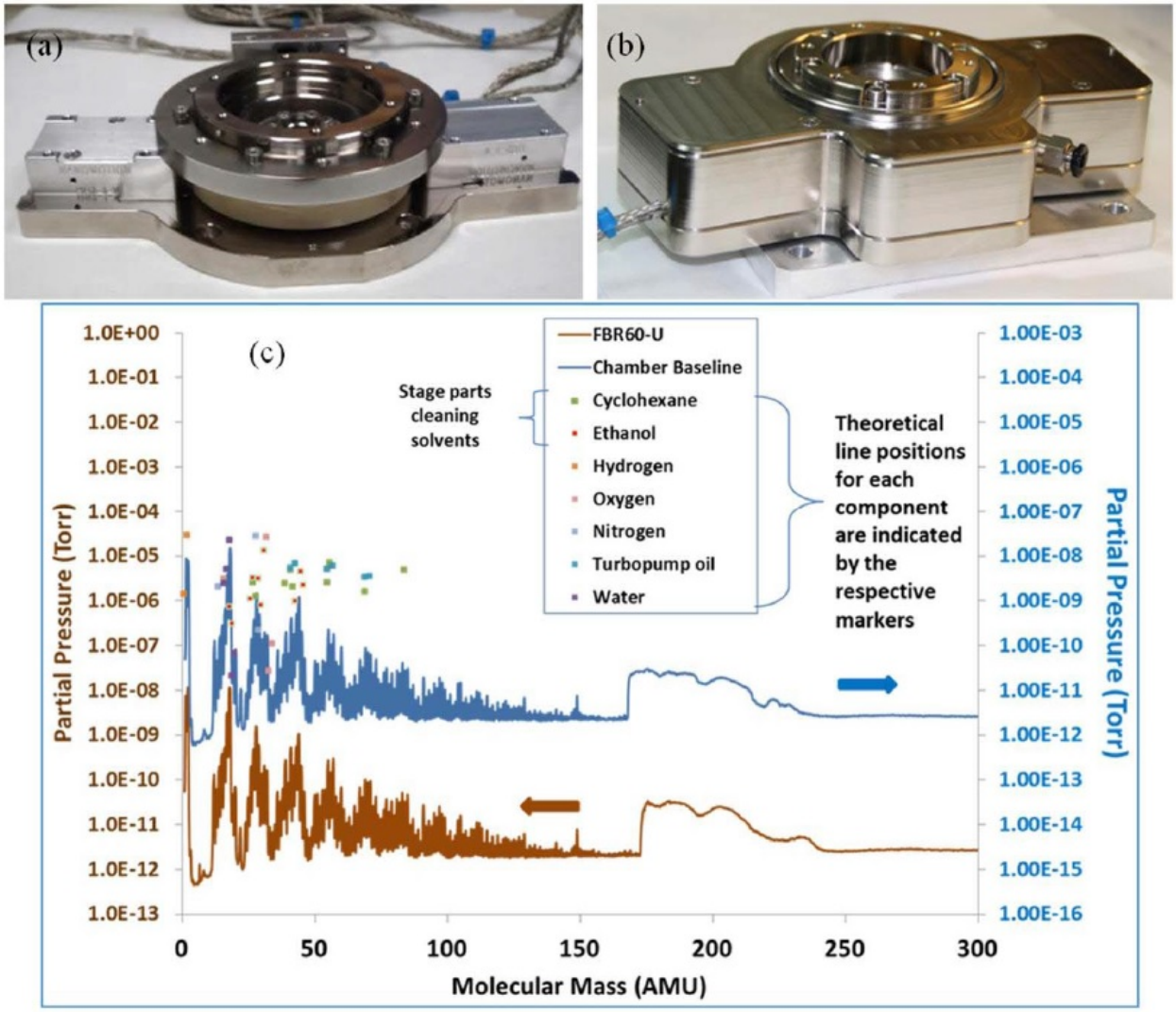
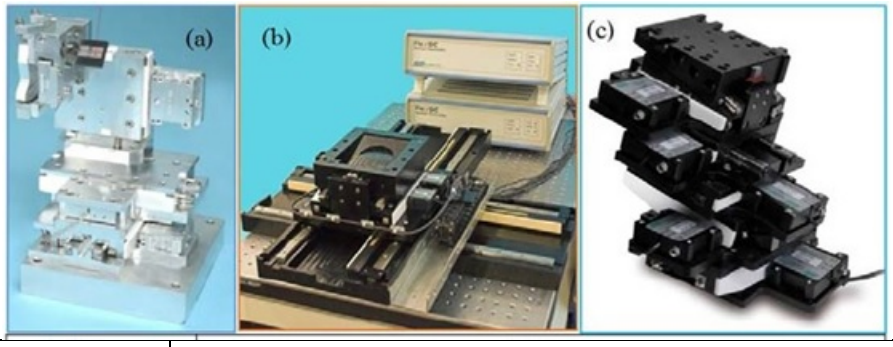


Рисунок 12. Сборка для поворотного движения Nanomotion FBR60-U на основе двух двигателей HR2 в вакуумном исполнении: (a) Изображение сборки без инкапсулирующего корпуса; (b) Изображение сборки в инкапсулирующем корпусе; (c) Анализ остаточного газа путем аналогового сканирования поворотной неактивной сборки FBR60-U (предназначенной для работы высоком вакууме) в активном вакууме (вакуумная камера 30 л, откачиваемая через турбомолекулярный вакуумный насос). Сканирование проводили на очищенной сборке через 60 ч после начала вакуумной откачки.

5.2. Полупроводниковый рынок

Двигатели L1B2 могут успешно соответствовать требованиям подачи и перемещения кремнийсодержащих подложек для чистых помещений, для работы в производственных и аналитических приборах. Использование метода резонансного привода позволяет работать несколькими элементами параллельно, тем самым увеличивая доступные силы для приведения в движение тяжелых нагрузок. Например, драйвер Nanomotion AB1B может приводить в движение до 64 элементов (или 8 двигателей типа HR8) на приводную ось, достигая комбинированной удерживающей силы 256 Н. Составные многоосные решения обеспечивают быстрое перемещение и успокоение при перемещении на большие расстояния и произвольную ориентацию. Примеры, показанные на Рисунке 13, включают сборки для метрологии и микроскопии.



Параметры	Сборка		
	(a) Сборка для ионной гравировки, предназначенная для работы в чистой коммнате	**(b) Подача и транспортировка кремнийсодержащих подложек**	**(c) Сборка для нанолитографии**
Количество осей	**4: X,Y,Z, Вращение**	**3: X,Y,Z**	**5: X,Y,Z и две перпендикулярные наклонные оси**
Диапазон хода	**20 мм для осей X,Y,Z, 90º для оси Вращения**	**360 мм для осей X и Y, 10 мм для оси Z**	**10º для каждой наклонной оси, 60 мм для осей X и Y, 8 мм для оси Z**
Масса нагрузки	**0,5 кг**	**10 кг**	**0,3 кг**
Максимальная скорость линейного хода	**200 мм/сек**	**200 мм/сек**	**200 мм/сек**
Точность позиционирования	**До 10 нм**	**До 100 нм**	**5 нм на ось, 25 нм итоговая точность**

Рисунок 13. Использование двигателей L1B2 для применения в метрологии и микроскопии: (a) четырехосевая сборки для гравировки ионным пучком; (b) трехосевая сборка для подачи и перемещения полупроводниковой пластины; (c) пятиосевая сборка для нанолитографии.

5.3. Биомедицинские применения

Уникальные преимущества двигателей L1B2 делают их привлекательными для использования в биомедицинских устройствах. Крайне низкое магнитное поле (0,1 нТл и время восстановления менее 3 мс) позволяет работать внутри МРТ-приборов. На рисунке 14 a,b показан пример применения, в котором два двигателя Nanomotion HR2-V используются для вращения вала, работающего внутри МРТ прибора с магнитным полем 3 Тесла.

Высокое отношение момента к габаритам и малое время отклика позволяют разрабатывать решения для перемещения небольших медицинских и электрооптических устройств. Пример миниатюрного модуля изменения фокусного расстояния для инструмента эндоскопии показан на Рисунке 14c. Этот модуль основан на небольшом элементе L1B2 длиной 6,3 мм, предназначенном для работы при низком напряжении двигателя 10 В, что позволяет работать в организме. Максимальный вращающий момент составляет 0,5 мНм. Максимальная угловая скорость составляет 30 Рад/с. Этот модуль изменения фокусного расстояния имеет общий вес 1,4 г и оснащен миниатюрной камерой диаметром 1,2 мм.

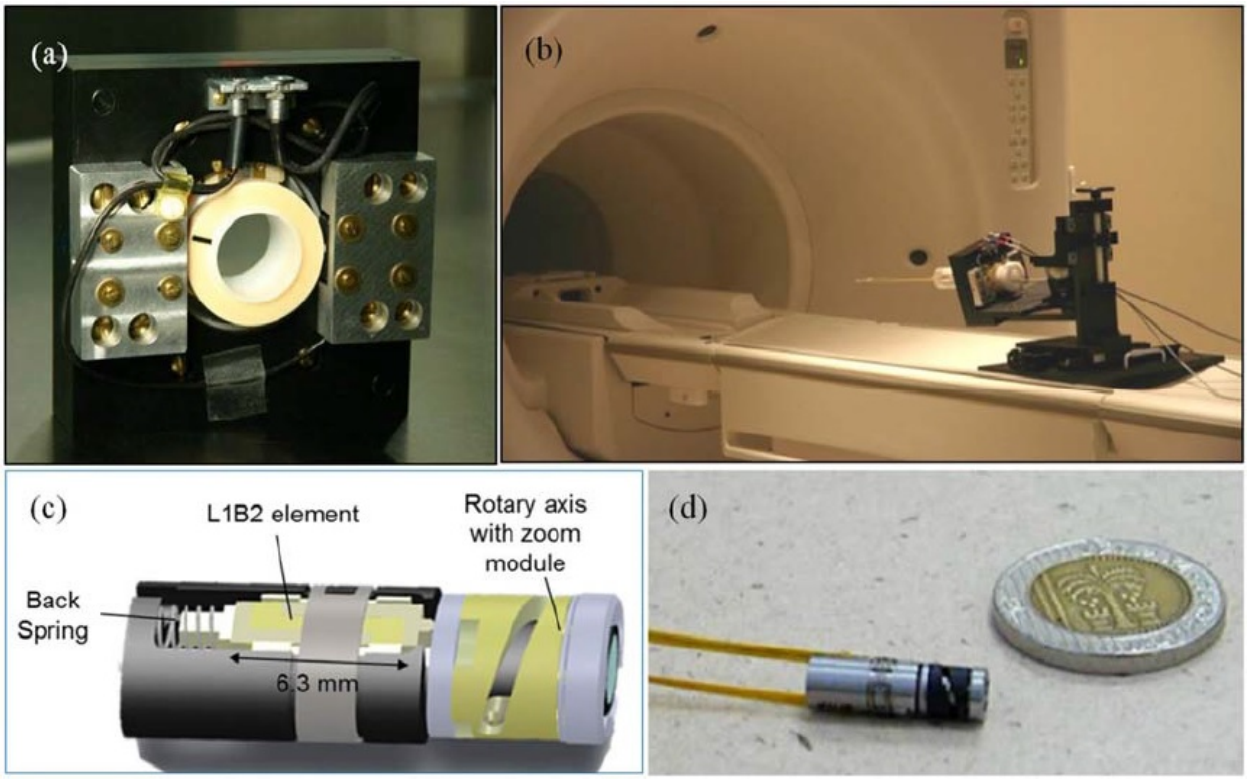


Рисунок 14. Примеры использования двигателя L1B2 в биомедицинских применениях: (a, b) Два двигателя Nanomotion HR2-V используются для вращения вала в аппарате для удаления опухоли, работающем внутри МРТ-прибора, имеющего магнитное поле 3 Тесла; (c) Схематичное изображение поворотного модуля, предназначенного для обеспечения возможности изменения фокусного расстояния для инструментов эндоскопии; (d) Изображение модуля, которое схематически показано на (c).

5.4. Электрооптические модули

При использовании в небольших электрооптических модулях, двигатели L1B2 обеспечивают быстрое точное движения в малых габаритах, при малых весах и при низком энергопотреблении. Примеры применений: затворы для коррекции неоднородности оптического поля (Non Uniformity Correction - NUC) для неохлаждаемой ИК-камеры и лазерных приложений, - показаны на рисунках ниже. Все шторки изготовлены на двигателе типа Nanomotion Edge [22], который основан на элементе L1B2 длиной 9 мм, обеспечивающем максимальную скорость более 200 мм/с, максимальную (блокирующую) силу выше 0,35 Н и жесткость двигателя выше 0,06 Н/мкм. Пример линейной шторки показан на Рисунке 15. Она имеет общий вес 15 г (перемещаемый вес равен 1,5 г), площадь апертуры 14,7 x 17,0 мм^2 и время открытия (открытия/закрытия) 150 мс. Модули поворотных шторок показаны на Рисунке 16. Одноосевой модуль, показанный на Рисунке 16a, весит всего 2 г и способен выполнять поворот на 90 ° менее чем за 50 мс. Двухосевой модуль, показанный на Рисунке 16b, может независимо вращать каждый из двух листов затвора, каждый весом около 2 г, с поворотом 60 ° за время 100 мс.

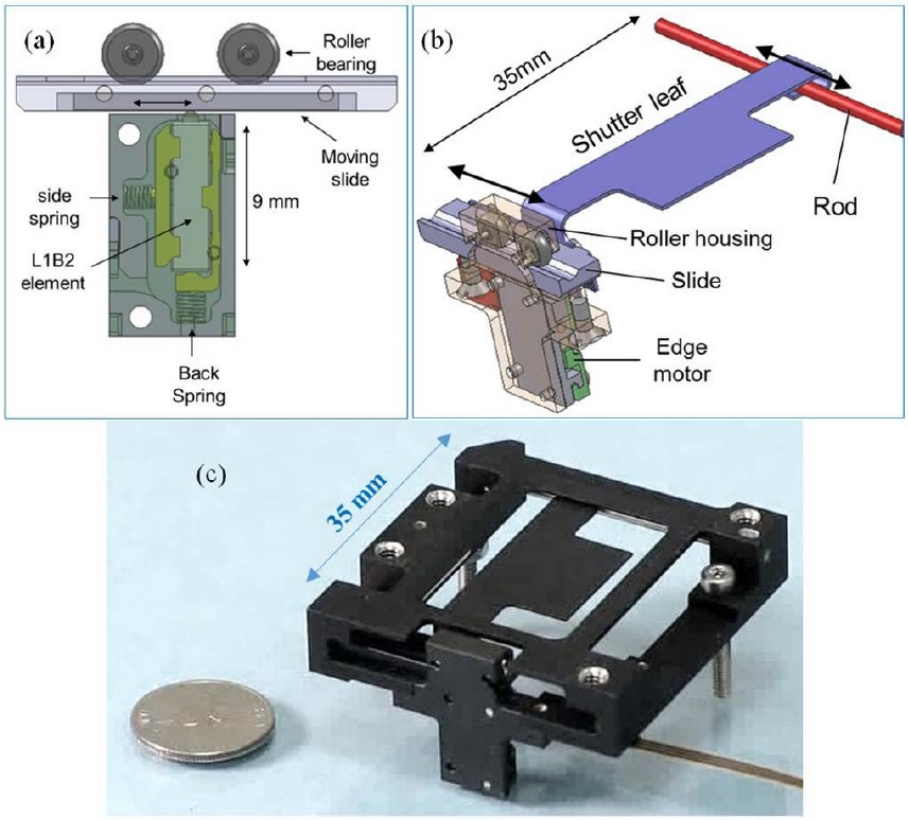


Рисунок 15. Линейный затвор для коррекции неоднородности оптического поля (Non Uniformity Correction – NUC), на основе двигателя Nanomotion Edge L1B2: (a) Схематичное изображение двигателя Edge motor, предварительно нагруженного на приводную керамическую полоску; (b) Схематичное изображение механизма движения лепестка; (c) Изображение линейного затвора NUC.

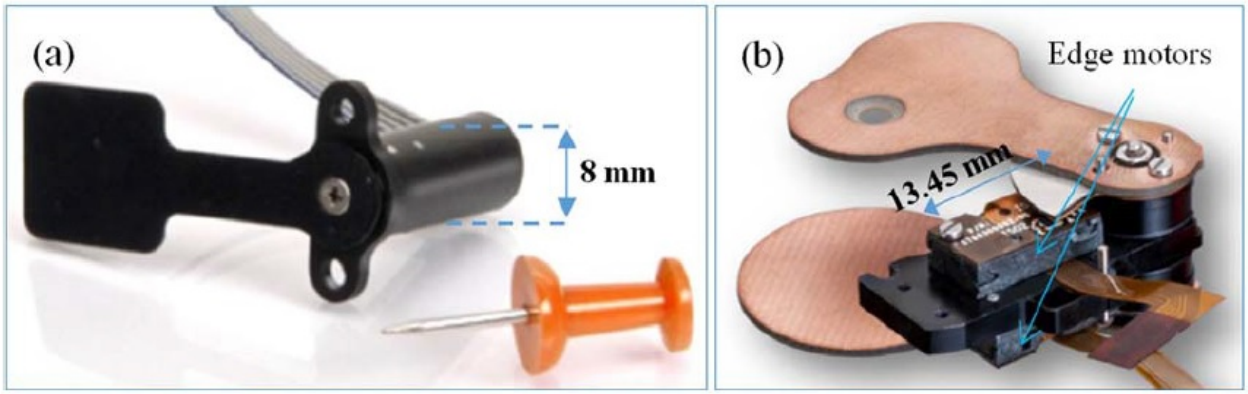


Рисунок 16. (a) Изображение NUC затвора для кругового движения на основе элемента L1B2 длиной 9 мм. Длина устройства составляет 20 мм; (b) Изображение модуля затвора с двумя осями вращения.

6. Заключение

Точные решения для осуществления перемещения, на основе ультразвуковых двигателей L1B2, способны реализовать точное позиционирование в нанометровом диапазоне, в то же время, обеспечивая высокие силы и большие динамические диапазоны регулировки скорости, тем самым осуществляя быстрый ход и установку при больших перемещениях в одном механизме.

Полное решение для осуществления перемещения состоит из двигателя, усилительно-преобразующего устройства, подвижной платформы и контроллера движения, работающего с замкнутым сервомеханизмом с использованием датчика обратной связи по положению. Все эти детали могут быть адаптированы для конкретного применения в полупроводниковой метрологии, аэрокосмической, биомедицинской и электрооптической областях.

В области метрологии преимущество производительности является ключевым, основанным на быстром перемещении, малом времени установления и неограниченном перемещении. При нескольких осях движения, используемых для реализации требований 3D-позиционирования, двигатель L1B2 обеспечивает значительные весовые преимущества. Возможны применения в условиях чистой комнаты, так как основной пьезо элемент совместим с условиями ультравысокого вакуума и смазка при его работе не требуется. Совместимость системы с ультравысоким вакуумом реализуется с использованием проверенных материалов в сочетании с современными технологиями очистки.

В аэрокосмической и электрооптической областях применения преимущества высокой плотности мощности, энергоэффективности по своей природе при малом размере и низком энергопотреблении, совместно с эргономичным дизайном и отсутствием редуктора, позволяют использовать благоприятное соотношение размер и мощности.

Для биомедицинских применений низкое значение магнитного поля позволяет работать в медицинских устройствах с высокими магнитными полями, в то время как небольшая занимаемая площадь благоприятна для применения в эндоскопии.

Текущая работа с двигателями L1B2 Nanomotion направлены на то, чтобы увеличить их производительность и область применения.

Выражение признательности: авторы выражают признательность за частичную поддержку со стороны главного научного управления Израиля и, в частности, консорциума MAGNET Metro450.

Конфликт интересов: авторы не заявляют о конфликте интересов.

Перечень литературы:

1. Uchino, K. Piezoelectric ultrasonic motor: Overview. Smart Mater. Struct. 1998, 7, 273–285. [CrossRef]
2. Sashida, T.; Kenjo, T. An Introduction to Ultrasonic Motors; Clarendon Press: Oxford, UK, 1993.
3. Nanomotion Ltd. Motion Systems. Available online: http://www.nanomotion.com/product-type/motion-systems/ (accessed on 11 April 2016).
4. Wiwattananon, P.; Bryant, R.G. Performance Comparisons and Down Selection of Small Motors for Two-Blade Heliogyro Solar Sail 6U CubeSat. NASA Technical Report NASA/TM–2015-218784. 2015. Available online: http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150017043 (accessed on 11 April 2016).
5. Uchino, K. Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. Defense Technical Information Center Document ADA429659. 2003. Available online: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA429659 (accessed on 11 April 2016).
6. Hemsel, T.; Mracek, M.; Twiefel, J.; Vasiljev, P. Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations. Ultrasonics 2006, 44, e591–e596. [CrossRef] [PubMed]
7. Aoyagi, M.; Tomikawa, Y. Ultrasonic motor based on coupled longitudinal-bending vibrations of a diagonally symmetric piezoelectric ceramic plate. Electron. Commun. Jpn. 1996, 79, 60–67. [CrossRef]
8. Tsai, M.S.; Lee, C.H.; Hwang, S.H. Dynamic modeling and analysis of a bimodal ultrasonic motor. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2003, 50, 245–256. [CrossRef] [PubMed]
9. Zumeris, J. Ceramic Motor. U.S. Patent No. 5,453,653, 26 September 1995.
10. Ganor, Z.; Shiv, L.; Karasikov, N.; Avital, A. Piezoelectric Motors and Motor Driving Configurations. U.S. Patent No. 6,979,936 B1, 27 December 2005.
11. Tomikawa, Y.; Takano, T.; Umeda, H. Thin rotary and linear ultrasonic motors using a double-mode piezoelectric vibrator of the first longitudinal and second bending modes. Jpn. J. Appl. Phys. 1992, 31, 3073–3076. [CrossRef]
12. Guo, M.; Dong, S.; Ren, B.; Luo, H. A double-mode piezoelectric single-crystal ultrasonic micro-actuator. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2010, 57, 2596–2600. [PubMed]
13. Li, X.; Chen, J.; Chen, Z.; Dong, S. A high-temperature double-mode piezoelectric ultrasonic linear motor. Appl. Phys. Lett. 2012, 101, 072902. [CrossRef]
14. Ganor, Z.; Rafaeli, I.; Shiv, L.; Karasikov, N. Multilayer Piezoelectric Motor. U.S. Patent No. 7,075,211 B1, 11 July 2006.
15. Nanomotion Ltd. AB1A Driver User Manual. Available online: http://www.nanomotion.com/wp-

content/uploads/2015/01/AB1A458000-00-User-Manual-AB1A1.pdf (accessed on 11 April 2016).
16. Nanomotion Ltd. AB5 and AB51 Drivers User Manual. Available online: http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/AB05458200-02-User-Manual.pdf (accessed on 11 April 2016).
17. Nanomotion Ltd. User Manual HR Motors. Available online: http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/09/HR00458000-00-HR-Motor-User-Manual.pdf (accessed on 11 April 2016).
18. Nanomotion Ltd. XCD Software Version 1.4.0.7. Available online: http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2014/05/XCD-software-version-1-4-0-7.pdf (accessed on 11 April 2016).
19. Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials Online. Available online: https://outgassing.nasa.gov/(accessed on 11 April 2016).
20. Ganor, Z. High Resolution Piezoelectric Motor. U.S. Patent No. 7,061,158 B2, 13 June 2006.
21. User Guide XCD-HR Controller/Drivers. Available online: http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/XCDH458002-00-XCD-HR-Contr-Driver-UM_.pdf (accessed on 11 April 2016).
22. Nanomotion Ltd. Edge Motor. Available online: http://www.nanomotion.com/motion-product/edge-motor/ (accessed on 11 April 2016).

© 2016 авторы; лицензия MDPI, Базель, Швейцария. Эта статья является статьей открытого доступа, распространяемой в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution (CC-BY) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).