

УДК 621.319.3 : 621.3.082.72

В. Л. Дятлов, Э. Г. Косцов

(Новосибирск)

ПЛАНАРНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ  
И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Рассматриваются принципы создания планарных пленочных электростатических и пьезоэлектрических двигателей (ППЭД и ПППД) методами технологии микроэлектроники. Анализируется совокупность требований к параметрам диэлектрика — основного компонента указанных двигателей. Показано, что лучшими диэлектриками при решении данной задачи являются пьезоэлектрики. Рассматриваются преимущества использования пьезоэлектрических пленок по сравнению с пьезокерамическими пластинами, применяемыми в классических пьезодвигателях. Проведен сравнительный анализ энергоемкости различных типов двигателей, показаны преимущества пленочных емкостных двигателей в диапазоне мощностей  $10^{-5}$ — $10^3$  Вт.

**Введение.** Трудности создания современных устройств точной механики и оптики в значительной мере определяются недостатками современных электрических двигателей, как индуктивных (ИД), так и емкостных, в частности пьезоэлектрических (ПД). Индуктивные двигатели имеют недостаточную точность позиционирования, большое время срабатывания, небольшой диапазон регулирования скорости. Для пьезоэлектрических двигателей характерны сравнительно небольшой срок службы, относительно невысокая стабильность характеристик и узкий диапазон мощности. Кроме того, современные индуктивные и пьезоэлектрические микродвигатели недостаточно технологичны. Однако наиболее серьезной проблемой современных автоматических микроманипуляторов является низкая энергоемкость двигателей (отношение мощности к массе), особенно индуктивных, и, следовательно, их большие габариты.

Цель работы — демонстрация возможности создания энергоемких электрических двигателей для точной механики и оптики путем использования технологии микроэлектроники.

Рис. 1, составленный исходя из анализа многочисленных справочных данных, характеризует энергоемкости  $W$  и мощности  $P$  индуктивных (○) и пьезоэлектрических (●) двигателей [1—4]. На этом рисунке также показаны линии постоянной массы двигателей (штриховые прямые). По этим линиям можно исходя из простых соотношений:  $10^3$  кг → 1 м, 1 кг →  $10^{-1}$  м,  $10^{-3}$  кг →  $10^{-2}$  м,  $10^{-6}$  кг →  $10^{-3}$  м — грубо оценить габариты двигателей. Очевидно, что чем выше энергоемкость, тем большую силу развивает электрический двигатель и лучше его быстродействие. Однако чем выше энергоемкость, тем выше коэффициент полезного действия двигателя (КПД). В этой связи на рис. 1 приведены (справа) значения условного коэффициента полезного действия, рассчитанные при тепловой нагрузке 30 Вт/кг.

Из рис. 1 видно, что энергоемкости индуктивных двигателей резко уменьшаются при уменьшении их мощности. Падение энергоемкостей происходит практически синхронно с уменьшением массы (габаритов) как раз при тех мощностях, которые необходимы во многих современных автоматических

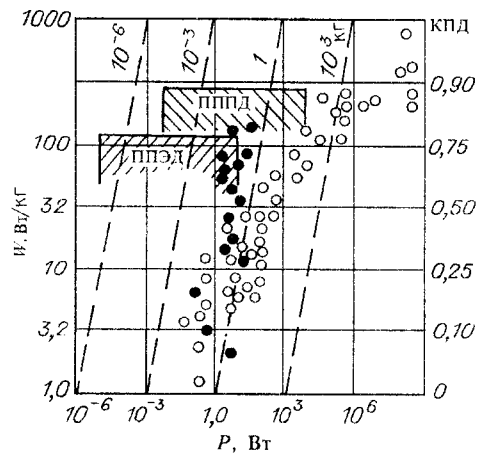


Рис. 1. Связь энергоемкости и КПД электрических двигателей различного класса с их мощностью:  
 ○ — индуктивные двигатели, ● — пьезоэлектрические

микроманипуляторах и оптических прецизионных устройствах. Следовательно, имеет место ограничение возможности выбора мощностей двигателей для большого класса практических задач. Иногда приходится применять двигатели с повышенной мощностью для достижения необходимой прецизионности и динамических параметров. А в тех случаях, когда требуются небольшие мощности (меньше  $10^{-1}$  Вт) и размеры двигателей (меньше 1—3 см), возникает неразрешимая проблема, поскольку соответствующие индуктивные и пьезоэлектрические двигатели еще не созданы (см. рис. 1). В этой связи ограничивается возможность практической реализации фундаментальной идеи увеличения точности и скорости механических перемещений за счет расположения электрических двигателей непосредственно у инструмента. Поэтому в настоящее время в манипуляторах применяются многочисленные протяженные механические (пневматические, гидравлические) передачи, приводящие к резкому увеличению инерционности управления, большому завышению мощности электрических двигателей, и как следствие этого имеет место громоздкость современных автоматических манипуляторов — роботов.

**Особенности емкостного способа электромеханического преобразования энергии.** Отметим преимущества емкостного способа электромеханического преобразования энергии перед индуктивным в электрических машинах:

— формирование в рабочем зазоре емкостных машин необходимого электрического поля достигается использованием небольшого количества материала, в то время как для создания соответствующего магнитного поля в рабочем зазоре индуктивных машин необходимо большое количество ферромагнитного вещества в виде значительного по весу и размерам магнитопровода;

— в емкостных двигателях более эффективно управление параметрами движения, в том числе при медленном движении с сохранением высокого КПД;

— в емкостных машинах можно отказаться от использования металлов с высокой проводимостью, в частности меди;

— емкостные машины более технологичны: они содержат плоские элементы конструкций (без обмоток и магнитопроводов).

Можно отметить, что уже в настоящее время потребности точной механики лучше обеспечивают не индуктивные, а емкостные двигатели. Вместе с тем возможности емкостных двигателей различного класса еще далеко не исчерпаны. Среди них наибольшими возможностями совершенствования обладают планарные пленочные электростатические (ППЭД) и планарные пленочные пьезоэлектрические (ПППД) двигатели [1—3].

Из рис. 1 видно, что пьезоэлектрические двигатели перекрывают узкий диапазон мощностей, приблизительно от  $10^{-1}$  до 10 Вт. Отдельные виды этих двигателей имеют высокие энергоемкости, которые превышают энергоем-

кости соответствующих индуктивных двигателей более чем на порядок. Этот факт следует оценить как большой успех направления емкостных электрических двигателей.

**Недостатки современных пьезоэлектрических двигателей.** При работе современных пьезоэлектрических двигателей [4] в зоне контакта концентрируется значительная энергия. Часть этой энергии, например, в момент проскальзывания прокладки по ротору превращается в тепло. При этом температура в зоне контакта может превышать 500 °С, и поэтому материал прокладки должен быть износостойким, термостойким и стойким к окислению. Таким образом, к недостаткам таких двигателей можно отнести, в первую очередь, повышенный износ контактирующих поверхностей. Именно он ограничивает ресурс данных двигателей.

Кроме того, установлено, что реально взаимодействие осциллятора с ротором происходит не по всей зоне контакта. Практически контакт наблюдается только в одном или нескольких пятнах, их расположение меняется во времени и необходимо чрезвычайно точное изготовление ротора: его конусность не должна превышать несколько микрон и такая же точность нужна для крепления осциллятора. Получение такой точности на большой поверхности и поддержание ее в течение всего времени эксплуатации ПД представляется технически трудноосуществимой задачей. Достаточно сказать, что идентичные ПД, изготовленные в одном технологическом процессе, могут значительно отличаться по мощности. Поэтому трудно рассчитывать на массовое изготовление стандартных мощных ПД.

Существенным фактором, ограничивающим мощность ПД, является относительно невысокая напряженность электрического поля (и соответственно невысокая энергоемкость), которая может быть приложена к пьезоэлектрической керамике без ее электрического пробоя (не более  $1-3 \cdot 10^4$  В/см) [5].

Напряжение питания современных ПД составляет обычно 100—200 В. Один из радикальных способов снижения напряжения питания — выполнение пьезоэлемента многослойным с параллельным соединением слоев. Современная технология пьезокерамики позволяет изготавливать пластинки толщиной 100 мкм, что обеспечивает снижение напряжения питания ПД в силовом режиме до 10 В. Однако воспроизводимость параметров таких ПД будет невысокой.

Можно отметить также, что распределение сил в конструкциях современных ПД не является оптимальным: сила прижатия статора к ротору превышает силу, определяющую движение ротора.

Таким образом, можно констатировать, что современные ПД, имея ряд несомненных преимуществ по сравнению с ИД, нашли пока относительно ограниченное применение в силу их чисто конструктивных особенностей.

**Пленочные электростатические двигатели.** В последние годы интенсивное развитие получила новая область микромеханики — пленочная электромеханика [5, 6] — и, в частности, направление планарных пленочных электростатических двигателей. Оно базируется на следующих принципах:

— применение емкостного способа электромеханического преобразования энергии;

— использование специфических для тонких пленок размерных физических эффектов;

— применение обратимого электростатического наката тонких пленок как для электромеханического преобразования энергии, так и для создания быстродействующих пленочных электростатических захватов, что позволило найти решение одной из проблем современных индуктивных и пьезоэлектрических двигателей: резко повысить отношение тангенциальных (полезных) сил к нормальным (паразитным) силам; электростатические захваты позволили также найти решение и другой проблемы современных пьезоэлектрических двигателей: рассредоточить поток мощности в рабочем зазоре на большей поверхности;

— использование планарной интегральной технологии;

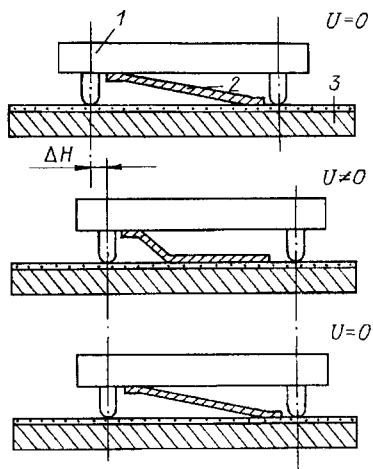


Рис. 2. Схематическая конструкция одного из лепестков планарного пленочного электростатического двигателя: 1 — подвижная пластина; 2 — лепесток; 3 — неподвижная пластина;

$H$  — шаг подвижной пластины за время одного цикла

— применение многоэлементного принципа передачи мощности от статора к ротору.

Схематическую конструкцию таких двигателей и принцип их работы иллюстрирует рис. 2. На поверхности неподвижной пластины (статорной) создается большое количество идентичных пленочных активных элементов с толкающими или тянущими лепестками («ресничками») — электродами. Подвижная пластина расположена над неподвижной пластиной и может переме-

щаться по направляющим движения (см. рис. 2). Подвижные «реснички», изгибаясь под действием электростатических сил (импульсов напряжения), периодически передают свое движение на подвижную пластину, возвращаясь после окончания действия импульса напряжения в исходное положение под действием собственных сил упругости. Нарращивание мощности таких двигателей осуществляется расположением подвижных и неподвижных пластин этажами (рис. 3), при этом общая толщина обеих пластин и зазора между ними может быть меньше 1 мм.

Оценки показывают, что к настоящему времени достижимы следующие параметры пленочных электростатических двигателей [1—3]: энергоемкость порядка 100 Вт/кг в диапазоне мощностей  $10^{-5}$ —10 Вт [8, 9], точность позиционирования —  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  м; скорость перемещения ротора 0,01—0,1 м/с; сила тяги  $10^3$ — $10^4$  Н/кг. На рис. 4 показаны типичные оптимальные значения шага  $H$ , удельной массы ротора  $M_0$  в зависимости от удельной силы тяги  $F_0$  (средняя сила тяги равна силе нагрузки) для шагового ППЭД при следующих его параметрах: напряжение импульсов питания  $V$  100 В; работа сил электростатического наката 0,3 Дж/м<sup>2</sup>; частота следования импульсов напряжения  $f$  2 кГц; длина, ширина и толщина каждого лепестка соответственно 450, 100, 1 мкм (материал лепестков — бериллиевая бронза — 2% Be). Заметим, что средняя скорость перемещения ротора  $V_{cp} = Hf$  [2], а предельная величина  $f$  в газовой среде при параметрах лепестка, близких к оптимальным, может достигать 5—10 кГц. Отметим также, что выбором величин  $f$  и  $V$  можно перейти от шагового режима работы двигателя к вибрационному (непрерывному). В по-

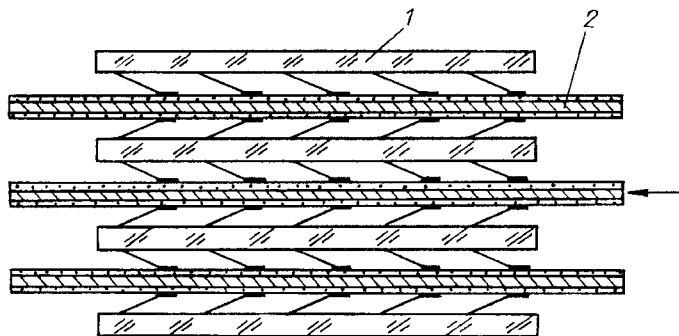
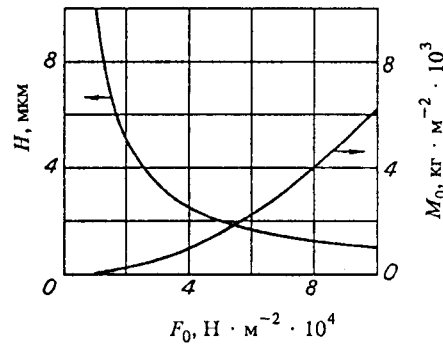


Рис. 3. Схематическое описание конструкции пленочного двигателя, позволяющей наращивать его мощность:

1 — подвижная пластина, 2 — неподвижная

Рис. 4. Зависимость шага ППЭД  $H$ , а также удельной предельной массы ротора  $M_0$  от силы тяги  $F_0$ , определяемой амплитудой импульса напряжения. Скважность импульсов напряжения равна 1



следнем случае скорость перемещения подвижной пластины будет больше (за счет увеличения шага), но точность позиционирования становится меньше.

Несмотря на то что это направление создания микродвигателей имеет хорошие перспективы дальнейшего развития, необходимо указать и на ряд его недостатков, которые характерны для указанных конструкций:

- использование открытого пространства, в котором протекают процессы, определяющие электромеханическое преобразование энергии;

- загрязнение с течением времени поверхности диэлектрика следами материала электродов;

- чувствительность характеристик микродвигателя к параметрам диэлектрика (к его микроскопическим параметрам, определяющим накопление в нем заряда).

Относительно простым решением задачи значительного повышения энергоемкости ППЭД является достижение оптимальных условий функционирования двигателя. В [2] при определении предельных напряжений пробоя газового промежутка М—Г—Д—М-структур с сохранением электрической прочности диэлектрика установлено, что максимальная удельная работа электростатического наката имеет место при определенном соотношении толщины диэлектрика  $d$  и величины его диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Для воздушного промежутка эта величина  $d/\epsilon = 10^{-7}$  м. С учетом необходимости получения достаточной мощности двигателя, достигаемой при относительно высокой величине напряжения порядка 100 В, а также требований надежности устройства (рабочее напряжение должно быть меньше напряжения пробоя в 2—3 раза) можно получить ряд ограничений на параметры пленки диэлектрика. Эти ограничения, наряду с указанным соотношением  $d$  и  $\epsilon$ , следующие:

1. Напряжение пробоя пленки не менее 200—300 В.
2. Тангенс угла диэлектрических потерь на заданной частоте (в пределах 0,5—5 кГц) не более 0,1.
3. Число локальных дефектов 1—2  $\text{см}^{-2}$  (как в технологии современной микроэлектроники).
4. Твердость по Моссу не менее 5.
5. Величина заряда, накапливаемого в диэлектрике за время одного такта, должна быть менее  $0,1CV$ ,  $C$  — геометрическая емкость структуры металл—диэлектрик—металл.

6. Заряд, накапливаемый в диэлектрике во время одного такта, должен нейтрализоваться за время, меньшее длительности такта (например, применением знакопеременного напряжения).

Таким образом, исходя из требований оптимального режима работы двигателя, можно априори ограничить класс диэлектрических материалов, которые возможно использовать для решения указанной задачи.

Низкая величина  $\epsilon$  органических материалов при определении малого значения  $d$  делает трудновыполнимыми пп. 1, 3, 4 несмотря на то, что в таких материалах хорошо реализуются пп. 5, 6.

Использование классических для микроэлектроники материалов, таких как нитрид кремния, также проблематично, исходя из трудностей выполнения пп. 5, 6. Кроме того, время стирания накопленного заряда в нитриде кремния не может быть меньше 10 мс (соответственно низки тактовые частоты и, следовательно, мощность) при напряженности полей стирания заряда, близких к пробивным значениям [7].

Применение пьезоэлектрических пленок в качестве диэлектрика способно разрешить выполнение всех указанных шести пунктов.

Действительно, выполнение п. 1 уже достигается при толщине сегнетоэлектрической пленки 2—4 мкм, при этом тангенс потерь имеет значение менее 0,1. Выполнение п. 3 зависит от технологических условий синтеза пленки. Твердость по Моссу у таких материалов, как ниобат бария—стронция, танталат лития, близка к 5—6. Поскольку пленки сегнетоэлектриков имеют достаточно совершенную кристаллическую структуру, то они отличаются относительно небольшой концентрацией локальных центров, небольшим значением сечений захвата носителей заряда и, следовательно, слабой способностью к накоплению заряда. Кроме того, возможность переключения направления поляризации за времена, меньшие 0,1 мс и характерные для сегнетоэлектрических пленок [8, 9], определяет и выполнение п. 6.

Таким образом, использование пьезоэлектрических пленок в качестве пассивных диэлектриков позволяет рассчитывать на значительное повышение параметров ППЭД.

**Пленочные пьезоэлектрические двигатели.** Устранение указанных недостатков как ПД, так и ППЭД может быть достигнуто при сохранении электростатического принципа работы путем применения в качестве активного диэлектрика пьезоэлектрических материалов и использования в тонких пленках непосредственно пьезоэлектрического эффекта.

Применение пьезоэлектрических пленок при создании планарных пленочных пьезоэлектрических двигателей открывает возможность появления нового поколения двигателей с более высокими энергетическими параметрами. В последние годы в связи с развитием технологии получения высококачественных сегнетоэлектрических пленок толщиной 1—5 мкм [10] эта задача становится реальной. В ПППД объединяются пьезоэлектрический и электростатический принципы работы.

Перечислим преимущества использования пьезоэлектрических пленок при создании пьезодвигателей по сравнению с применением пьезокерамики:

1. Большая удельная (на единицу объема, веса) концентрация энергии за счет возможности применения высоких напряженностей электрического поля, поскольку электрическая прочность пленок по сравнению с пьезокерамикой более чем на порядок выше. Концентрация энергии, используемой для преобразования в механическую форму, как показывают оценки, исходя из выражения  $W = K_{ЭМ}^2 C_0 V^2 / 2 = K_{ЭМ}^2 \epsilon \epsilon_0 V^2 / 2d$  и величины  $K_{ЭМ} = 0,5—0,7$ , может достигать значений 10—50 Дж/м<sup>2</sup>,  $K_{ЭМ}$  — коэффициент электромеханического преобразования энергии. Наши экспериментальные исследования показывают, что напряжение пробоя пленки ниобата бария—стронция (одного из лучших сегнетоэлектриков) может превышать, благодаря проявлению размерного физического эффекта, значение 100 В при толщине сегнетоэлектрической пленки 2 мкм. Величина диэлектрической проницаемости в этих пленках, полученных методом ВЧ-распыления, более 2000.

Большой прогиб пленки и соответственно большая эффективность преобразования электрической формы энергии в механическую при меньших потерях энергии за счет распространения в объеме образца упругих колебаний. Пленочная конструкция допускает прогиб до 1 см и более, в то время как пьезокерамика — 5—10 мкм.

2. Высокая надежность. Если пьезодвигатели на основе керамики имеют ресурс  $2 \cdot 10^3—4 \cdot 10^3$  ч, то пленки допускают значительно более продолжительную работу. Это обусловлено хорошей механической прочностью пленок (в частности, число циклов механических напряжений в тонких мелкозернистых пленках превышает  $10^{12}$  без заметных изменений их усталостных характеристик [6]) несмотря на то, что при изгибе пленок высок диапазон динамических нагрузок — от  $10^2$  до  $2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

3. Достижение эффективного преобразования энергии, поскольку в ПППД происходит рассредоточение энергии на большой поверхности конструкции

двигателя и не возникает перегрева его компонент — одной из основных проблем современных ПД.

4. Более низкая стоимость, обусловленная массовым процессом производства основных компонент двигателя, основанным на использовании современных технологических приемов микроэлектроники. Такая технология позволяет выдержать прецизионность изготовления движущихся компонент двигателя, что увеличивает его мощность и воспроизводимость параметров.

5. В отличие от классических пьезокерамических двигателей выбор частоты в данном случае не определяется узким диапазоном частот, обусловленным конструктивными особенностями и геометрическими факторами. Частоты колебаний пьезопленки не резонансные, это также определяет более высокую надежность.

6. Быстрая (блочная) смена отдельных узлов, а также наращивание мощности из стандартных блоков благодаря конструктивным особенностям таких двигателей.

7. Возможности создания многослойных конструкций и изготовления сложных конфигураций элементов устройства.

**Особенности использования пьезоэлектрических пленок при создании планарных двигателей.** Известно, что сегнетоэлектрические пленки даже без предварительной поляризации обладают значительным пьезоэффектом (с коэффициентом пьезоэффекта  $d_1$ , близким к значению, которое получается после поляризации в «жестких» режимах соответствующей пьезокерамики), поскольку они текстурированы и униполярны [11]. В частности, пленки PZT, полученные золь—гель-методом толщиной 0,2—0,6 мкм, имеют величину пьезокоэффициента в пределах  $400 \cdot 10^{-12}$  м/В, при этом такая величина характерна для образцов, подвергнутых предварительной поляризации при напряжении 2 В [12].

Кроме того, известно также, что для пленок характерен и высокий коэффициент электромеханической связи. В частности, на текстурированных пленках  $\text{PbTiO}_3$  наблюдался аномально высокий коэффициент электромеханической связи — около 0,8, сохраняющийся и на высоких частотах, вплоть до 30—100 МГц, при величине  $d_1$ , близкой к пьезокоэффициенту монокристалла —  $100—150 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Пленки синтезировались эпитаксиально на поверхности  $\text{SrTiO}_3$  методом ВЧ-распыления и отличались анизотропией электрофизических характеристик, они не требовали предварительной поляризации [13].

Таким образом, качество пьезопленок не будет ограничивающим фактором при создании на их основе пьезодвигателей.

Однако создание многоэлементных пьезоэлектрических устройств средствами технологии микроэлектроники связано с необходимостью оптимизации толщины пьезоэлектрика.

Со стороны малых значений толщина пленки  $d$  ограничена следующими факторами:

1. Характер зависимости основных сегнетоэлектрических свойств (в том числе пьезоэлектрического коэффициента и диэлектрической проницаемости) от толщины. Экспериментальные данные показывают, что только начиная с толщины пленок 2—3 мкм эти свойства приближаются к свойствам соответствующих монокристаллов (рис. 5). На рисунке показана зависимость величины  $\epsilon$  (прямо связанной с величиной электромеханического фактора [14]) пленок ниобата бария—стронция (НБС), полученных ВЧ-распылением, от их толщины. Аналогичная зависимость от толщины характерна и для других сегнетоэлектрических параметров пленок, в том числе и для  $d_1$ , поскольку они связаны между собой качеством кристаллической структуры образца.

2. Уменьшение эффективности преобразования энергии за счет увеличения собственной проводимости с уменьшением толщины пленки и появления участков повышенной локальной проводимости.

3. Увеличение технических трудностей осуществления более высокочастотных колебаний, которые необходимо обеспечить при малых значениях  $d$ .

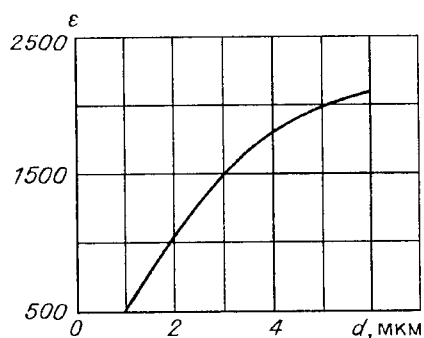


Рис. 5. Зависимость величины диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки  $\epsilon$  НБС от ее толщины

Со стороны больших значений толщина  $d$  ограничена следующими факторами:

- 1) увеличение внутренних механических напряжений в пленке по мере роста  $d$ , приводящих к ее отрыву от подложки;
- 2) усложнение процесса проведения фотолитографии;
- 3) теплофизические и схемотехнические факторы.

При создании больших устройств микроэлектроники существенными параметрами становятся емкости межэлементных соединений и входные емкости систем управления. При большом числе микромоторов ( $M$ ) относительное уменьшение емкости этих элементов с ростом  $d$  приводит к уменьшению эффективности перераспределения энергии. Данное обстоятельство особенно важно при создании систем с большим  $M$ . Например, задавая  $M = 10^6$ , полагая, что погонная емкость соединений, доступная технологии микроэлектроники,  $10^{-10}$  Ф/м [15] и допуская 10 % потери энергии на перезарядку межсоединений, нетрудно определить максимальное значение  $d_{\max}$  при заданном значении  $f$ . В частности, для материала с  $\epsilon = 1000$   $d_{\max} = 4,5$  мкм. Этот пример указывает на то, что пьезоэлектрические материалы с малой величиной  $\epsilon$  (такие как  $PVF_2$ ,  $LiTaO_3$ ) не могут быть эффективно использованы при создании многоэлементных моторных систем.

Вышеизложенное дает основание утверждать, что построение высокоэнергетических моторных систем более перспективно на основе материалов с большим значением  $\epsilon$ . В то же время даже этот простой анализ показывает, насколько серьезной при создании мощных электромеханических моторов нового поколения будет проблема соединений.

В настоящее время, несмотря на то что идея использования пьезоэлектрических пленок для построения нового поколения микродвигателей достаточно широко обсуждается и, в частности, для создания биомедицинских инструментов, прецизионных оптических позиционеров, применений их для ремонта интегральных схем и т. п. [16, 17], общая концепция построения пленочных пьезодвигателей еще не создана, не рассмотрены преимущества таких двигателей по сравнению с пленочными электростатическими двигателями, не описаны также конкретные конструкции эффективных пленочных пьезоэлектрических двигателей.

Можно отметить, что большие перспективы практического применения в различных областях техники открываются при использовании пьезоэлектрических полимерных пленок, таких как  $PVF_2$ , в том числе в качестве биморфов с большой амплитудой изгиба. В то же время величина  $K_{ЭМ}$  в лучших органических пленках типа PVDF составляет только 0,1—0,2 [18]. Этот момент и низкая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon = 10—11$ ) не позволяют надеяться на изготовление на основе органических пьезоэлектриков достаточно мощных пьезодвигателей.

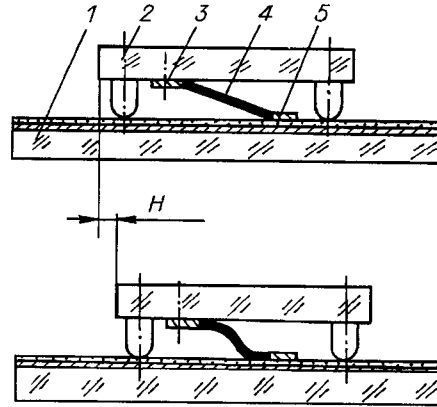
В то же время создание мощного, до  $10^3—10^4$  Вт, пьезоэлектрического двигателя, как показывают наши оценки, возможно на основе совокупности менее мощных ПППД, получаемых прецизионными методами интегральной технологии.

Действительно, полагая, что ограничивающим фактором увеличения мощности является теплоотвод с поверхности  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup> (воздушное охлаждение) либо  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (охлаждение с помощью жидкости), и допуская накачку электрической энергии 10—50 Дж/м<sup>2</sup> (с последующим преобразованием в ме-



Рис. 6. Схематическая конструкция одного из лепестков планарного пьезоэлектрического двигателя:

1 — неподвижная пластина; 2 — подвижная пластина;  
3 — место крепления лепестка; 4 — пьезоэлектрическая пленка; 5 — пленочный электростатический захват;  
H — шаг



ханическую), получим рабочие частоты колебания пленочных пьезоэлементов 1—50 кГц, что является для пленочных многослойных структур реальным. Таким образом, для того чтобы обеспечить мощность двигателя  $10^4$  Вт, следует использовать 0,1—1 м<sup>2</sup> площади его конструкции. Оптимизация параметров отдельных «ресничек» определяется конкретными техническими характеристиками двигателя. Однако, полагая, что эти лепестки будут иметь размеры в пределах 1 мм<sup>2</sup>, нетрудно определить в двигателе мощностью  $10^4$  Вт, что число таких лепестков должно быть до  $10^5$ — $10^6$ . Ясно, что такое количество микродвигателей может быть изготовлено только с помощью технологии микроэлектроники.

Схематически одна из конструкций отдельного планарного пьезоэлектрического микродвигателя и принцип его работы представлены на рис. 6. Перемещение ротора происходит путем изгиба пьезопленки при приложении электрического поля. Отличие от аналогичных конструкций ППЭД состоит в том, что лепесток представляет собой не двухслойную, а трехслойную структуру: электрод—пьезопленка—электрод, при этом пьезоэлектрическая пленка может быть выполнена в виде биморфной структуры, а электроды должны существенно отличаться толщиной. Преобразование энергии в данном случае происходит не только за счет электростатического наката, но и за счет обратного пьезоэлектрического эффекта, вызывающего изгиб указанной структуры. При этом последний эффект в электромеханическом преобразовании энергии является доминирующим.

#### ВЫВОДЫ

Совокупность электрофизических характеристик пьезоэлектрических пленок позволяет рассчитывать на создание на их основе методами технологии микроэлектроники ППЭД с энергоемкостью более высокой, чем при использовании линейных диэлектриков.

Уникальные характеристики пьезоэлектрических пленок: высокое значение пьезоэлектрического коэффициента, значительно более высокие по сравнению с пьезокерамикой напряженность поля пробоя и механическая прочность — позволяют создать на их основе планарные пьезоэлектрические двигатели, которые по сравнению с ППЭД имеют более широкий диапазон мощностей и в первую очередь в области больших значений мощности, а по сравнению с классическими пьезодвигателями имеют больший ресурс работы и надежность, а также мощность и энергоемкость.

При современном уровне технологии изготовления пьезоэлектрических пленок возможно создание ПППД с энергетической емкостью 10—50 Дж/м<sup>2</sup> и абсолютной мощностью до  $10^3$  Вт.

Конструктивные особенности ПППД могут базироваться в основном на предшествующих разработках ППЭД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дятлов В. Л., Косарев Ю. Г. Пленочные электростатические моторные среды как путь к экологической технологии // Моделирование в пленочной электромеханике. Новосибирск, 1991. Вып. 143: Вычислительные системы.
2. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С. Электромеханические емкостные среды в интегральном исполнении // Там же.
3. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С., Пьянков Ю. А. Пленочные электрические двигатели // Электричество. 1996. № 1.
4. Лавриненко В. В., Карташов И. А., Вишневецкий В. С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980.
5. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении. Л.: Машиностроение, 1986.
6. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С., Фадеев С. И. Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991.
7. Arnett P. C. Transient conduction on insulators at high fields // J. Appl. Phys. 1975. 46, N 12. P. 5236.
8. Scott J. F., Kammerdiner L., Parris M., Traynor S., Ottenbacher V., Shawabkeh A., Oliver W. F. Switching kinetics of lead zirconate titanate submicron thin-film memories // J. Appl. Phys. 1988. 64, N 2. P. 787.
9. Baginsky I. L., Kostsov E. G. Information writing mechanisms in thin-films MFIS-structures // Ferroelectrics. 1993. 143. P. 239.
10. Kostsov E. G. Ferroelectric films: Peculiarities their application in construction of new generation memory devices // Ferroelectrics. 1995. 167. P. 169.
11. Дудкевич В. П., Фесенко Е. Г. Физика сегнетоэлектрических пленок. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1978.
12. Lefki K., Dormans J. M. Measurement of piezoelectric coefficient of ferroelectric thin films // J. Appl. Phys. 1994. 76. P. 1764.
13. Takeuchi H., Kushida K. PbTiO<sub>3</sub> thin films for piezoelectric applications // ISAF-90. Yrbana, 1990. P. 6.1.
14. Mason W. P. Physical Acoustics: Principles and Methods. N. Y.: Academic, 1964.
15. Solomon P. M. Сравнение полупроводниковых приборов для скоростных логических схем // ТИИЭР. 1982. 70, № 5.
16. Swartz S. L., Wood V. E. Ferroelectric thin films // Condensed Mater News. 1992. N 5. P. 4.
17. Flynn A. M., Tavrow L. S., Bart S. F., Brooks R. A., Ehrlich D. J., Udayakumar K. R., Cross L. S. // J. Microelectromechan. Syst. 1992. 1. P. 44.
18. Ohiguchi H., Hattori H. et al. Ferroelectric and piezoelectric properties of b-form PVDF films crystallized under high pressures and their application to high temperature ultrasonic transducers // ISAF-90. Yrbana, 1990. P. X.17.

*Поступила в редакцию 5 февраля 1996 г.*