

УДК 621.318.51

ПЛЕНОЧНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

В.Л.Дятлов, С.И.Фадеев

Пленочная электромеханика, как часть непрерывно развивающейся области микромеханики, в настоящее время является средством эффективного решения многих актуальных проблем, стоящих перед такими разделами техники, как телевидение, световые ЭВМ и т.д. Благодаря использованию новейших средств пленочной технологии и современных материалов микроэлектроники, в том числе и полупроводников, стало возможным создание электромеханических элементов, удовлетворяющих требованиям, которые предъявляются к элементам микроэлектроники.

Предлагаемая статья состоит из двух частей. В первой части проводится краткий анализ проблем, возникающих на стыке механики и электроники. Вторая часть содержит сведения о конкретных результатах исследований в области электромеханики.

1. Применение пленочной технологии позволяет существенно миниатюризировать традиционные элементы электромеханики (реле, оптические затворы и т.д.): продольные размеры деталей уменьшаются до долей миллиметра, поперечные размеры (толщина пленок и межэлектродные зазоры) — до 1 мкм, масса деталей — до 10^{-9} г. Возросшая гибкость подвижных деталей полностью исключает необходимость использования подшипников, лимитирующих срок службы многих известных электромеханических элементов^{*}). Создание конструкций с малыми межэлектродными зазорами приводит к возникно-

ванию относительно больших электростатических или магнитных сил, что в сочетании с небольшими массами подвижных деталей повышает быстродействие и уменьшает потребляемую мощность элементов пленочной электромеханики. Вместе с тем значительно увеличивается демпфирование движущихся частей в газе, возрастает влияние токов в зазорах и диэлектриках.

Использование механических принципов в пленочных элементах позволяет достаточно простым способом варьировать оптические свойства в обычных условиях в диапазоне, обусловленном переносом применяемых в конструкциях материалов: от материалов с физически предельными свойствами на прохождение света до материалов с физически предельными свойствами на поглощение (или отражение) света. Аналогично достигается изменение проводимости в обычных условиях от физически максимально возможной, характерной только для металлов, до физически минимально возможной, характерной только для диэлектриков. Благодаря прочностным свойствам специальных металлических пленок, малых ползучести и релаксации, пленочные электромеханические элементы отличаются высокой долговременной надежностью.

Перечисленные качественные и количественные изменения в поведении электромеханических элементов позволяют, во-первых, улучшить характеристики известных приборов, во-вторых, открывают возможность создания принципиально новых приборов с новыми областями применений — в электрооптике и в электронике. Из новых приборов следует выделить такие, в которых соединяются функции элементов механики и полупроводниковых элементов, например транзисторы с резонирующим затвором. В настоящее время большое развитие получают работы по созданию матриц пленочных электростатических элементов, выполняющих функции сред для электронной записи, хранения и оптического отображения двумерных изображений — эквивалента современных фотоматериалов.

Моделирование элементов пленочной электромеханики представляется существенно новой задачей, включающей такие важные проблемы, как адекватное описание физических явлений и математическое моделирование.

Как показывают исследования, в первой проблеме наиболее важно изучение:

^{*}) Использование гибких деталей вместо подшипников хорошо известно в электромеханике. Применение пленок расширяет эти возможности.

- токов и зарядов на границе раздела газ - диэлектрик и в объеме диэлектрика при больших полях;

- токов в сверхмалых газовых зазорах с учетом границ металлов и диэлектрик и т.д.

- усталостных свойств пленочных материалов, в том числе при больших частотах изменения нагрузок и при большом числе циклов, превышающих те, при которых обычно исследуются материалы;

- оптических эффектов при перемещениях металлических и диэлектрических пленок у поверхности оптически прозрачных веществ;

- особенностей демпфирования пленок в различных газах при малых и сверхмалых зазорах.

Математически модель пленочного электромеханического элемента (например, пленочного электростатического реле) формулируется в виде двух краевых задач. Первая - описывает положение равновесия пластинки (динамическое или статическое) с граничными условиями, выражающими различные способы закрепления ее краев, под действием сил, порождаемых электростатическим полем. Вторая - определяет распределение потенциала в межэлектродном зазоре и в конечном счете механическую силу притяжения, выраженную через напряженность поля вдоль поверхности пластинки. Взаимобусловленность этих задач следует из того, что положение пластинки, являющейся частью границы во второй краевой задаче с заданным значением потенциала, заранее не известно и может быть найдено из совместного решения первой и второй задач.

Совокупность физических явлений, которые необходимо учитывать при описании работы элемента, определяет и характеризует трудности математического моделирования работы пленочных электромеханических элементов. В то же время математическая модель (и численные методы ее расчета), дающая достаточно хорошее согласование с экспериментальными результатами, позволяет использовать ЭВМ для расчета характеристик элемента и анализа многочисленных вариантов, которые рассматриваются исследователем при создании прибора.

Подчеркнем, что совпадение теоретических и экспериментальных результатов зависит главным образом от того, насколько хорошо постановка второй из указанных краевых задач отражает

реальные физические явления (поверхностные и объемные токи в диэлектрике, напряженность поля в узком зазоре и т.д.). Достаточно точный учет условий механического равновесия представляется более простой задачей.

С математическим моделированием связано определение конструктивных параметров, при которых обеспечивались бы заданные рабочие характеристики. С учетом ограничений на конструктивные параметры, вытекающих из условий работоспособности элемента и особенностей технологического производства, эта задача сводится к задаче проектирования и может быть сформулирована в терминах нелинейного программирования.

2. В настоящее время из патентной литературы [1-16] известно большое число конструкций электромеханических устройств.

Основной подвижной деталью всех конструкций является пленочная пластинка (в натянутом [4] либо сжатом [17] состоянии), края которой закреплены различными способами. В ряде случаев используется пластинка (например, в форме дуги окружности [16]), предварительно деформированная вследствие внутренних напряжений. Под пластинкой на подложке расположены неподвижные электроды, а в некоторых конструкциях, когда требуется сочетание механических и полупроводниковых свойств, - и полупроводниковые структуры (см. [1-2]). Пространство между пластинкой и электродами может быть заполнено податливым в механическом отношении веществом, например резиной [21]. В тех случаях, когда пластинка выполняется из полимерного материала, она металлизирована [18-19]. Движение пластинки происходит под действием сил притяжения, обусловленных электростатическим полем в межэлектродном зазоре.*)

Первые патенты и авторские свидетельства на электромеханические устройства, необходимые технические характеристики которых могли быть получены только при использовании пленок, появились почти одновременно в США и СССР. В 1965 г. в США был предложен транзистор с резонирующим затвором [1-2]. В 1966 г. в США - модулятор светового излучения лазера [3] и в СССР - пленочное электростатическое реле [4-8, 10-14].

*) Известны пленочные конструкции, в которых используют нитные силы [6].

В настоящее время известен ряд изделий на пленочных электро-механических элементах. Фирмы Perkin - Elmer и IBM сообщили о создании электро-механических пленочных модуляторов света для ввода данных в световые ЭВМ [18-20]. Эти модуляторы характеризуются весьма высокими техническими параметрами: до 10^6 ячеек-модуляторов на квадратный дюйм; скорость переключения - $5 \cdot 10^{-8}$ сек; 10^{12} переключений без заметных изменений в полимерной пленке; 10^{-11} Джоуля на переключение одной ячейки.

Фирма RCA сообщила о разработке телевизионной проекционной системы для проекции на большой экран, основным элементом которой является трехслойная мишень в виде тонкой слюды и резины, покрытой металлической пленкой [21,22]. Известно, что обычные телевизионные системы на электронно-лучевых трубках не пригодны для изображения на большой экран (10 м^2 и больше). Предложенная система обладает высокими качествами, свойственными известным системам типа "Эйдофор" [23-24], и в то же время лишена их коренных недостатков - малой надежности, высокой стоимости. Возможность запоминания изображения позволяет использовать эту систему в качестве дисплея.

Другие модификации систем для отображения информации на большой экран представлены в [20,25]. В этих системах используются матрицы с большим числом (10^6) пленочных пластинок с двусторонним и односторонним закреплением, что позволяет исключить применение резин, ограничивающих число перемещений и вызывающих необходимость применения больших напряжений электронных трубок.

Достоинства пленочных электро-механических элементов во многом объясняются конструктивно-технологической гибкостью пленочных электро-механических устройств: применением консольных и балочных (натянутых или сжатых) конструкций, подбором различных материалов для подвижных пластин (металлы, полимерные, волнистые материалы). При этом собственные частоты пластин могут меняться от единиц герц до 1 мГц [18,19], фиксированные перемещения - от десятых долей микрона для балочных конструкций до миллиметров в консольных конструкциях, времена перемещения - от 50 нсек до значительных в условиях вязкой среды или при использовании релаксационных процессов в диэлектриках.

Реализация возможностей пленочных электро-механических элементов при разработке приборов и устройств с новыми свойствами

связана с выполнением большого комплекса условия, включая стабильность, технологическую повторяемость характеристик и т.д. Именно эти вопросы становятся основными на этапе конкретных разработок. В этой связи большое внимание было уделено исследованию механических свойств пленок.

В ряде пленочных электро-механических конструкций рекомендовано применение пленки бериллиевой бронзы. Определены технологические режимы получения этих пленок [26-28], исследованы внутренние напряжения и закономерности коробления, показаны ее высокие механические свойства [28]. Так, показано (с использованием экстраполяции), что полученные пленки бериллиевой бронзы имеют релаксацию в 10% за 12 лет. Технологические вопросы изготовления различных конструкций пленочных электро-механических элементов методами сборки, групповыми методами низкотемпературной вакуумной сварки и удаления промежуточных слоев отражены в [30-32].

Рабочие параметры некоторых элементов (пленочные электро-механические реле, модуляторы света, резонаторы) определяются как объемными, так и поверхностными свойствами диэлектриков [33], причем в диэлектрике играют роль процессы, связанные с образованием остаточных зарядов. Механизм этих процессов может быть удовлетворительно описан с применением модели, разработанной в [34]. Кроме того, следует обеспечить условия получения надежного тонкопленочного конденсатора [35-36], образующегося между пластинкой и неподвижными электродами. Специфические особенности использования пленочных контактов в элементах отражены в [37-41]. На основании проведенных исследований указаны диапазоны напряжений и токов, в которых может быть гарантирована устойчивая работа элементов, выбраны некоторые материалы для изготовления пленочных контактов [38].

Для определения оптимальных рабочих параметров пленочных электро-механических элементов проведены работы по их математическому моделированию, в частности решен ряд модельных примеров, в которых рассматривается положение равновесия пластинки под действием сил, качественно совпадающих с электростатическими силами притяжения.

Отметим существенную особенность взаимодействия электростатических и механических сил. В случае динамического равно-

весия существует характерная разность потенциалов, разделяющая режимы ограниченных колебаний пластинки и монотонного смещения в сторону неподвижного электрода [42]. В случае статики эта характерная разность потенциалов является верхней границей для разности потенциалов, при которой статическое равновесие возможно [44,45].

С решением задачи статического равновесия пластинки связан расчет многих важных параметров элемента, определяющих условия его работоспособности. Примеры точных решений даны в [46, 47]. Разработаны численные методы [48,49], позволяющие для типовых конструкций [4-12] находить достаточно точные оценки характерной разности потенциалов. Показано, что меньшей разности потенциалов соответствуют два положения равновесия, одно из которых является неустойчивым. Предлагаемые численные методы существенно используют то обстоятельство, что задача будет иметь единственное решение, если задавать не разность потенциалов, а максимальное смещение пластинки. Общий подход к решению этой задачи использует вариационный метод, причем в качестве функции, минимизирующей потенциальную энергию пластинки, удобно взять сплайновую функцию. В случае цилиндрического прогиба пластинки и малых зазоров расчет сил, действующих на пластинку, упрощается, и задачу можно свести к решению нелинейного интегрального уравнения.

В работе [51] поставлена и решена задача о поперечной устойчивости мембраны пленочного электростатического реле.

Некоторые вопросы, связанные с выбором конструктивных параметров ПЭР, обеспечивающих работоспособность элемента с заданными рабочими параметрами, рассмотрены в [41,50]. В [52] эта же задача сформулирована как задача нелинейного программирования, причем метод решения проиллюстрирован на тестовом примере.

Перечисленные работы не затрагивают многих указанных выше вопросов. Однако их можно рассматривать как определенную основу для разработки стабильных и надежных приборов пленочной электромеханики.

Л и т е р а т у р а

1. NATHANSON H.C., WICKSTROM R.A. Microelectronic frequency selective apparatus with vibratory member and means responsive thereto. Пат. США № 3413573, 1968 (приоритет от 18.06.1965).
2. NATHANSON H.C., DAVIS J.R., KIGGINS T.R. Resonant gate transistor with fixed position electrically floating gate electrode in addition to resonant member. Пат.США №3590343,1971.
3. PRESTON K. The Membrane Light Modulator. Патент США № 3433959,1968 (приоритет от 25.07.66), № 3479109, № 3463372, 1968.
4. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле. Авт.свид. № 204440. - "Бюллетень изобретений", 1967, № 22, с.54 (приоритет от 20.10.66).
5. ДЯТЛОВ В.Л., ЕВРЕЙНОВ Э.В., СТЕРЕЛЮХИН В.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле. Авт.свид.СССР, № 226034. - "Бюллетень изобретений", 1968, № 28, с.52.
6. ДЯТЛОВ В.Л., ЛЕМЕНТЬЕВ С.К., ДАНИЛЕВСКИЙ Ю.Л., МАРКОВ Г.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Поляризованное реле. Авт.свид.СССР, № 236645. - "Бюллетень изобретений", 1969, № 7, с.65.
7. ДЯТЛОВ В.Л., ПОТАПОВ Б.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С., СОХИН А.А. Электростатическое реле. Авт.свид. СССР, № 292198. - "Бюллетень изобретений", 1971, № 4, с.140.
8. СТЕРЕЛЮХИН В.А., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле. Авт.свид.СССР, № 226035. - "Бюллетень изобретений", 1968, № 28, с.52.
9. СКВОРЦОВ А.В., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ЧЕРЕПОВ Е.И. Высоочастотный динамический конденсатор. Авт.свид.СССР, №280675.-"Бюллетень изобретений", 1970, № 28, с. 74.
10. КОНЫШКИН В.В., ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., СОХИН А.А., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле.Авт.свид. СССР, № 312384. - "Бюллетень изобретений", 1971, № 25, с.221.
11. ВОРОНИН В.Н., КОЛОСАНОВ В.А., САВЧЕНКО А.П., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ФОМИН Б.И., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле.Авт.свид.СССР, № 312383. - Там же, с.221.
12. ЧЕСНОВОВ В.В. Электростатическое реле. Авт.свид. СССР, № 314304. - "Бюллетень изобретений", 1971, № 27, с.207.
13. ДЯГИЛЕВ Ю.П., ГАВРЮШИН Л.П., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Электростатическое реле. Авт.свид.СССР, № 326657. - "Бюллетень изобретений", 1972, № 4, с.198.
14. ВОРОНИН В.Н., КОЛОСАНОВ В.А., САВЧЕНКО А.П., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ФОМИН Б.И., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле.Авт.свид.СССР, № 327534. - "Бюллетень изобретений", 1972, № 5, с.154.
15. ВОРОНИН В.Н., МИШИН А.И., ЧЕРЕПОВ Е.И. Коммутатор.Авт.свид.СССР, № 391732. - "Бюллетень изобретений", 1973, № 31, с.184.

16. ЛИ Р.Х. Электромеханический световой клапан. Пат. США № 3553364, 5.01.71.

17. АНДРЕЕВА Л.Е. Упругие элементы приборов. М., ГИТМЛ, 1962, с.59.

18. ПРЕСТОН. Мембранный световой модулятор и его применение в оптических ЦВМ. - "Зарубежная радиоэлектроника", 1970, № 10, с.112-116.

19. ПРЕСТОН, НОРГЕН. Распознавание образов вычислительной машиной с помощью процессора изображений. - "Электроника", 1972, № 22, с.26-41 (русс.перевод).

20. Ван РААЛБТ. Новая светоклапанная система для проекции на большой экран. - "Зарубежная радиоэлектроника", 1971, № 12, с.90-97.

21. ЛАНГНЕР. Светомодулирующие ЭЛТ для проекционных систем отображений. - "Электроника", 1970, № 25, с.16-24 (русс.перевод)

22. Запоминающий индикатор с деформируемой пленкой. - "Электроника", 1972, № 2, с.16-17 (русс.перевод).

23. BAUMANN E.I. - "Brit.Instrum.Radio Eng.", 1952, N 12, p.69.

24. GOOD W.E. - "Proc.Nat.Electron.Conf.", 1968, N 24, p.771.

25. LANGNER G.O. CRT-Display Target. - "IBM Technical Disclosure Bulletin", 1970, vol.13, Aug., N 3, p.603.

26. ГРАНКИН А.И., ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю. Окисление меди и сплава медь-бериллий при конденсации. - В кн.: Вычислитель на системы. Вып.46, Новосибирск, 1971, с.126-129.

27. КАПЛИН В.А., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С., СВОБОДИН Е.И. Масс-спектрометрический контроль процесса напыления бериллиевой бронзы. - Там же, с. 64-67.

28. ЗИЛИНГ К.К., ИЛЬИН М.Н., ПЧЕЛКИН В.Ю. Ползучесть и релаксация конденсированных пленок сплава Cu-Be. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.52, Новосибирск, 1972, с.107-115.

29. ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю., ИЛЬИН М.Н. Исследования релаксации свободных пленок. Отчет ИМ СО АН СССР, 1970 г.

30. ЧЕСНОВОВ В.В. Способ изготовления системы пленочных электродов с зазором. Авт.свид.СССР, № 321970. - "Бюллетень изобретений", 1971, № 35.

31. КОЛОСАНОВ В.А., СОЛДАТЕНКОВА В.В., ФОМИН Б.И., ЧЕРЕПОВ Е.И. Некоторые вопросы технологии многослойных пленочных структур с микрозазорами. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.46, Новосибирск, 1971, с.53-55.

32. СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые вопросы изготовления пленочных электростатических реле. - Там же, с. 56-59.

33. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С., ПОЛИНА Т.В., ФАДЕЕВ С.И. Модель диэлектрика для пленочных электромеханических элементов. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974 г.

34. КОСЦОВ Э.Г. Исследование влияния особенностей микро-рельефа поверхности электродов на процессы прохождения тока и явления в тонкопленочной системе металл-диэлектрик-металл. Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук. Новоси-бирск, 1968 (ИМ СО АН СССР).

35. МИХАЙЛОВСКИЙ И.П. Исследование пробивных напряжений диэлектрических пленок в процессе старения. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 52. Новосибирск, 1972, с. 59-63.

36. МИХАЙЛОВСКИЙ И.П. Особенности старения тонкопленочных систем. Материалы Всесоюзной конференции "Физика диэлектриков и перспективы её развития", том. III, Л., 1973, с. 92-93.

37. АБРАМОВ Г.А., ПОТАПОВ Б.С., РОГАЛЕВ А.И., СТЕРЕЛЮХИН В.А. Об измерении сил размыкания контактов пленочных электростатических реле. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 24-28.

38. КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Переходное сопротивление пленочных контактов при малых контактных усилиях. - Там же, с. 33-37.

39. КОПЫТКОВ Н.Ф., ПОТАПОВ Б.С. Экспериментальное исследование процесса размыкания пленочных контактов. - Там же, с. 37-42.

40. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., СТЕРЕЛЮХИН В.А. Эрозионный износ контактов ПЭР из сплава медь-бериллий. - В кн.: Вычислительные системы. Вып.52. Новосибирск, 1972, с. 107-115.

41. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С. Статистические характеристики пленочных электростатических реле с выступающим контактом. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с.8-13.

42. НОВГОРОДЦЕВА Л.З., ФАДЕЕВ С.И. Исследование нелинейных колебаний струны под действием сосредоточенных сил. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 56. Новосибирск, 1973, с. 84-102.

43. ФАДЕЕВ С.И., НОВГОРОДЦЕВА Л.З. Математические моделирование контактных процессов в микрозазоре электростатического реле. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

44. ЛУКЬЯНОВА Р.Г., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Расчет статистических параметров механической модели пленочного электростатического реле. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 40. Новосибирск, 1970, с. 3-50.

45. ДЯТЛОВ В.Л., ПЯНКОВ Ю.А., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Некоторые результаты расчета статистических характеристик пленочных электростатических реле. - В кн.: Вычислительные системы. Материалы ко II Всесоюзной конференции, секция IV. Новосибирск, 1969, с. 72-75.

46. ФАДЕЕВ С.И. Численный метод решения одного интегрального уравнения типа Гаммерштейна в связи с расчетом характеристик пленочного электростатического реле. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 50. Новосибирск, 1972, с. 3-30.

47. ФАДЕЕВ С.И. Метод расчета статистических параметров пленочных электростатических реле на ЭВМ. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 14-20.

48. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле. -В кн.: Вычислительные системы. Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Вып. 5. Новосибирск, 1968, с. 159-175.

49. ДЯТЛОВ В.Л., ПЬЯНКОВ Ю.А. Исследование влияния формы зазора на основные характеристики пленочных электростатических реле. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 48-52.

50. ДЯТЛОВ В.Л., ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., РОГАЛЕВ А.И. Основные параметры пленочных электростатических реле. -Там же, с. 3-7.

51. ДЯТЛОВ В.Л., РОГАЛЕВ А.И. Электромеханические пленочные элементы. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 49. Новосибирск, 1972, с. 132-146.

52. ФАДЕЕВ С.И., ЛУКЬЯНОВА Р.Г. Применение метода штрафных функций в задаче проектирования ПЭР. Отчет ИМ СО АН СССР, 1974.

Поступила в ред.-изд.отд.

20 марта 1974 года