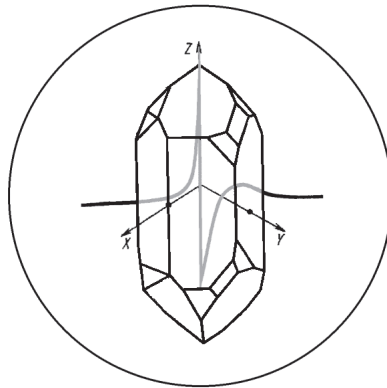


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2013»
2 – 6 декабря 2013 г., Москва

Под редакцией
академика РАН А.С. Сизова

Часть 3

Москва – 2013

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2013»
2–6 декабря 2013 г., Москва

Под редакцией
академика РАН А.С. Сизова

Часть 3

**FUNDAMENTAL PROBLEMS
OF RADIOENGINEERING AND DEVICE
CONSTRUCTION**

Proceedings of the International Scientific and
Technical Conference «INTERMATIC – 2013»
December 2–6, 2013, Moscow

Edited by A. Sigov

Part 3

Москва - 2013

УДК 539.1: 621.315.5: 621.382:

Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2013», 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 3. – 216 с.

ISBN 978-5-2830-3352-5

В настоящий сборник включены материалы Международной НТК «INTERMATIC–2013», отражающие новые результаты научных и инженерных исследований в области радиоэлектронного приборостроения.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической электроники и технологии радиоэлектронного приборостроения. Он также может быть использован преподавателями, аспирантами и студентами при изучении соответствующих курсов.

В настоящий сборник также включены соответствующие теме материалы V Всероссийской научно-технической школы-конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – 2013», 3–6 декабря 2013 г., Москва.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ

Редакционная коллегия:

Ю.В. Гуляев (председатель), А.С. Аджемов, К.А. Воротилов,
П.А. Лучников, И.В. Соловьев, С.А. Никитов, В.Г. Орлов,
А.С. Сигов (ответственный редактор)

Научное издание

Редактор – *А.П. Лучников*
Компьютерная верстка – *Д.С. Серегин*

ОАО издательство «Энергоатомиздат», 107031, Москва, ул. Рождественка, 5/7

Подписано в печать с оригинал-макета 26.11.2013 г.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,95. Уч.изд. л. 23,76.
Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Галлея-Принт»

ISBN 978-5-2830-3352-5

© Энергоатомиздат,
МГТУ МИРЭА,
ИРЭ РАН,
2013

⋮

,

⋮

• •

«

»

«

»

«

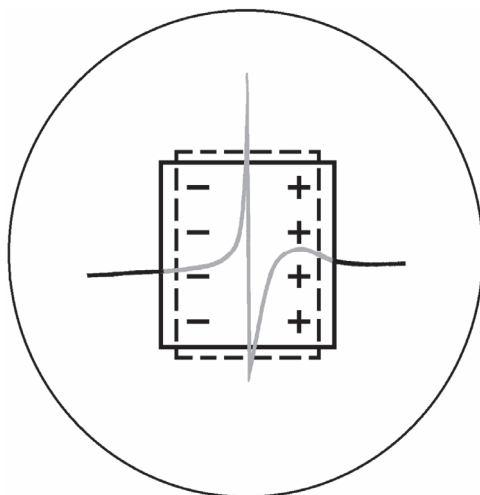
»

О Р Г К О М И Т Е Т

Гуляев Ю.В.	- (Россия) - председатель
Сигов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Аджемов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Лучников П.А.	- (Россия) - ученый секретарь
Балыхин Г.А.	- (Россия)
Бержанский В.Н.	- (Украина)
Ибраев Н.Х.	- (Казахстан)
Камильджанов Б.И.	- (Узбекистан)
Кудж С.А.	- (Россия)
Перно Ф.	- (Франция)
Рогачев А.В.	- (Беларусь)
Скотт Дж.	- (Великобритания)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Никитов С.А.	— председатель,
Орлов В.Г.	— ученый секретарь,
Безруков В.Н.,	Воротилов К.А.,
Есаулов Н.П.,	Мальцев П.П.,
Крашенинников А.И.,	Лось В.П.,
Морозов А.И.,	Нефедов В.И.,
Ивашов Е.Н.,	Пронин И.П.,
Резниченко Л.А.,	Санников В.Г.,
Сидорин В.В.,	Соколов В.В.,
Соловьев И.В.,	Суржииков А.П.,
Фетисов Ю.К.,	Шаврин С.С.



Приборы и компоненты РЭА

СОДЕРЖАНИЕ

Приборы и компоненты РЭА	5
1. Певцов Е.Ф., Гришунин К.А., Аль-Натах Р.И. Моделирование микроэлектромеханического волнового гироскопа средствами САПР CoventorWare	7
2. Савченко Е.М., Дроздов Д.Г., Сиомко В.О. Модели гетероструктур AlGaN/GaN для проектирования силовых и СВЧ полупроводниковых приборов	13
3. Ходорович В.Г., Певцов Е.Ф. Проект цифрового узла устройства коррекции неоднородности чувствительности интегральной схемы теплового многоэлементного приемника излучения	16
4. Ионов Л.П., Соловьев И.В., Ушакова У.А. Кремний-германиевые СВЧ СБИС синтезаторов частот на основе ФАПЧ для диапазона частот 6 ГГц и выше	22
5. Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Шашурин В.Д. Исследование деградации вольт-амперных характеристик AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов	25
6. Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А. Исследование процессов деградации светодиодов AlInGaP/GaAs и их взаимосвязи с параметрами низкочастотного шума	30
7. Малышев И.В., Ионов Л.П., Павлов В.Н., Милехин В.В., Шабардин Р.С. Кремний-германиевая СВЧ СБИС селектора каналов приемника спутникового телевидения	34
8. Шабардин Р.С., Шабардина Н.В., Бычков М.С. Кремний-германиевые квадратурные модуляторы и демодуляторы для диапазона частот до 6 ГГц и выше	38
9. Савченко Е.М., Гладких М.В., Першин А.Д., Пронин А.А. Пассивные СВЧ аттенюаторы фиксированного номинала на основе кремния и арсенида галлия	41
10. Бычков М.С., Павлов В.Н., Репин В.В. Реализация кремний-германиевых широкополосных радиоканалов и их фрагментов в диапазоне частот до 4 ГГц	45
11. Серов В.Н., Федотов М.С. Цифровая регистрация сигналов магнитоэлектрических взаимодействий	48
12. Удалов А.И., Битюков В.К., Марьин С.В. Особенности восстановления емкости герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторов	52
13. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С. СВЧ модуль усилителя мощности для систем радиочастотной идентификации	57

14. Савченко Е.М., Дроздов Д.Г., Вагин А.В., Гаранович Д.И. Современные конструкции интегральных элементов высокочастотного комплементарного биполярного технологического процесса	60
15. Никишкин П.Б. Разработка цифрового радиовещательного приёмника по технологии RDS	64
16. Иванов А.И., Дукач И.А., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Макеев М.О., Федоркова Н.В. Исследование деградации преобразователей частоты СВЧ-радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов	69
17. Сергеев В.А., Фролов И.В. Измерение параметров схем замещения многоэлементных двухполюсников методом импедансной спектроскопии с применением шумового тестового сигнала	72
18. Ходак М.С., Малафеев С.И., Гамаюнов А.Р. Разработка и моделирование адаптивного ПИД-регулятора с переменной структурой	76
19. Сгадова Н.А. Влияние случайных ошибок юстировки на радиотехнические параметры параболической антенны	81
20. Гранкин В.П., Гранкин Д.В., Запара А.Н., Карпов Е. Диоды Шоттки Pt-GaAs-Ag для генерации тока в водородной энергетике	85
21. Lipovich A.Yu. A subband equalizer with the structural adaptation	89
22. Устинов А.Б., Калиникос Б.А. Полосно-пропускающие СВЧ фильтры с низкими вносимыми потерями и с широким диапазоном перестройки частоты	93
23. Рыбковский Д.В., Осадчий А.В. Управление эффективными массами дырок путем изменения толщины слоистого соединения GaSe	95
24. Мамедов А.К. Широкополосный оптронный усилитель по двухканальной структуре	99
25. Приступчик Н.К. Методика моделирования чувствительных элементов МЭМС на основе эластичных металл-полимерных композитов	102
26. Клюев Ал.В., Рыжкин М.И., Клюев Ан.В. Оценка влияния флуктуаций коэффициента передачи смесителя на диоде Шоттки на форму спектральной линии колебания на выходе	105
27. Мамедов А.К. Оptrонный усилитель с двумя идентичными каналами	109
28. Приступчик Н.К. Способ создания инерциальных МЭМС на основе эластичных металл-полимерных композитов	112
29. Серов В.Н., Морозов А.А. Генератор токовых сигналов на основе микроконтроллера	115
30. Серов В.Н., Ульянов М.В. Предусилители для резонансных пьезодатчиков	118
31. Клюев А.В. Физические механизмы генерации низкочастотного шума в Ti-Au/GaAs диодах Шоттки	122

32. Зайцев А.А. Метод повышения быстродействия и уменьшения площади интегральных ФАПЧ синтезаторов частот	126
33. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Высокочастотные активные оптические системы с усилителями яркости для неразрушающего контроля	130
34. Зайцев А.А. Алгоритм формирования управляющих сигналов импульсного частотно-фазового детектора в оптимальном по быстродействию контуре ФАПЧ	132
35. Зарипов А.Р., Сушко Б.К., Ямалетдинова К.Ш. Устройство для измерения количества связанной воды в керне методом высокочастотной кондуктометрии	136
36. Иовдальский В.А., Манченко Л.В., Моргунов В.Г., Герасименко С.В., Аюпов И.Н. Оптимизация геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ – диапазона	140
37. Липнин Ю.А., Пудалов А.Д. Возможности применения твердоэлектролитной ячейки со средой Pd – PdO	144
38. Иовдальский В.А., Манченко Л.В., Моргунов В.Г., Герасименко С.В., Киличенков Р.Б. Дальнейшее совершенствование геометрии плоских балочных выводов компонентов ГИС СВЧ-диапазона	148
39. Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г., Трегубов В.Б., Моргунов В.Г., Молдованов Ю.И., Гринберг Д.С. Улучшение характеристик ГИС каскадов усилителей мощности СВЧ-диапазона	152
40. Куликов Д.В., Савельев Д.И. СБИС СнК для систем управления электропитанием ответственного применения	156
41. Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Исследование сорбционно-емкостного метода измерения влажности бензола датчиками фирмы Honeywell	158
42. Пучнина С.В. Герметичные соединения сапфир – металл, работающие в условиях агрессивного воздействия паров щелочных металлов	162
43. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Автоматизация установки для измерения мощности шума активных четырехполосников методом удвоения	166
44. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Адаптивный алгоритм измерения спектральной плотности мощности низкочастотного шума полупроводниковых приборов	168
45. Ульянов А.В. Сравнительный анализ методов измерения цветности светодиодов	170
46. Ульянов А.В., Сергеев В.А., Рогов В.Н. Анализ влияния мультипликативных шумов на процесс измерения цветности светоизлучающих диодов	174
47. Шиманович Д.Л. Формирование пассивной части многокристалльных модулей на базе алюмооксидных оснований и Ni-Cu металлизации	178

48. Шиманович Д.Л. Электрохимический синтез свободных двухслойных Al_2O_3 -пластин для СВЧ-систем	182
49. Шиманович Д.Л. Методы создания встроенных алюминиевых коммутационных элементов в объеме свободных анодных Al_2O_3 -оснований	186
50. Терентьев Д.А. Методика измерения тепловых деформаций катодного узла и настройки магнитной системы для клистронов миллиметрового диапазона	190
51. Ивашов Е.Н., Федотов К.Д. Применение тепловых трубок в туннельной микроскопии	194
52. Ивашов Е.Н., Князева М.П. Поперечные и продольные колебания пьезопривода при формировании квантовых точек	198
53. Гавриш С.В. Короткодуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой	205
54. Гавриш С.В., Герасимов М.Ю., Сурдо А.В., Шерстнев Д.В. Диагностика теплового состояния сапфировых оболочек разрядных ламп специального назначения	208

ПОПЕРЕЧНЫЕ И ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЬЕЗОПРИВОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

© 2013 г. Е.Н. ИВАШОВ, М.П. КНЯЗЕВА

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ
e-mail: eivashov@hse.ru

При разработке биморфных элементов пьезопривода в нанотехнологии необходимо учитывать их поперечные колебания, оказывающие существенное влияние на точность позиционирования острия кантилевера относительно подложки для наиболее точного нанесения квантовых точек на подложку. Различные конструкции кантилевера приносят в устройство свои особенности.

Примером устройства, в котором более существенную роль играют поперечные колебания биморфного элемента, может послужить устройство возбуждения кантилевера, представленного на Рис. 1:

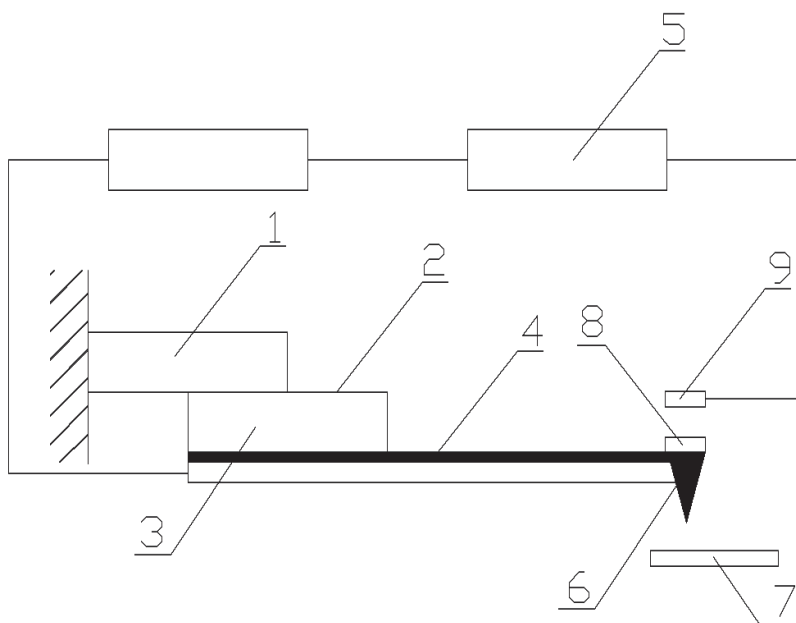


Рис. 1. Устройство возбуждения кантилевера.

Устройство возбуждения кантилевера содержит держатель кантилевера 1 с кантилевером 2, включающим основание 3 с гибкой балкой 4, источник возбуждения колебаний 5 гибкой балки 4 с острием 6 относительно образца 7; на гибкой балке 4 в зоне расположения острия 6 закреплена круглая магнитная нанопластинка 8, а источник возбуждения колебаний 5 гибкой балки 4 с острием 6 выполнен в виде генератора магнитных колебаний 9 с рабочими частотами до 200 кГц.

Устройство возбуждения кантилевера работает следующим образом: при изменении частоты генератора магнитных колебаний 9 изменяется и частота колебаний гибкой балки 4 с острием 6 в результате взаимодействия круглой магнитной нанопластинки 8 с генератором магнитных колебаний 9, который выполнен на базе стандартной катушки индуктивности с сердечником (условно не обозначена).

Перейдем к собственным формам колебаний биморфного элемента и функциям, их определяющим.

Собственные формы колебаний биморфного элемента и функции, их определяющие.

Простейшим периодическим решением уравнения свободных колебаний биморфного элемента

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (1)$$

является так называемое главное колебание, в котором $y(x,t)$ изменяется с течением времени по гармоническому закону

$$y(x,t) = \varphi(x) \sin(\omega t + \alpha) . \quad (2)$$

$\varphi(x)$ – функция, устанавливающая закон распределения максимальных (амплитудных) отклонений точек оси биморфного элемента от равновесного расположения, называется формой главного колебания или собственной формой.

ω – собственная частота.

Отбор собственных частот и соответствующих им собственных форм осуществляется с помощью уравнения собственных форм и краевых условий задачи.

Уравнение собственных форм однородной задачи:

$$EJ\varphi^{IV}(x) - \omega^2 \mu \varphi(x) = 0 \quad (3) \quad \text{или} \quad \varphi^{IV}(x) - k^4 \varphi(x) = 0 , \quad (4)$$

где $k^4 = \frac{\mu \omega^2}{EJ} \quad (5) \quad \text{или} \quad k^4 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \theta \quad (6)$

Уравнение (4) имеет следующие четыре независимых частных решения: $\cos kx, \sin kx, \operatorname{ch} kx, \operatorname{sh} kx$, его общий интеграл:

$$\varphi(x) = A \cos kx + B \sin kx + C \operatorname{ch} kx + D \operatorname{sh} kx \quad (7)$$

Он содержит четыре произвольные постоянные A, B, C, D , которые должны быть подобраны так, чтобы для функции $\varphi(x)$ выполнялись краевые условия, т. е. условия закрепления концов биморфного элемента. В обычных случаях число краевых условий равно числу произвольных постоянных – по два на каждом конце. Все они выражаются равенствами нулю двух из следующих четырех величин:

$$\varphi(x), \varphi'(x), \varphi''(x), \varphi'''(x),$$

пропорциональных соответственно прогибу, углу поворота, изгибающему моменту и перерезывающей силе в точках $x = 0$ или $x \equiv l$. Выполняя эти условия, мы получим четыре однородных уравнения, из которых найдутся отношения постоянных A, B, C, D и уравнение для определения собственных частот системы.

Во многих отношениях более удобной оказывается следующая система частных решений уравнения (4):

$$\begin{cases} S(x) = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} kx + \cos kx) \\ T(x) = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} kx + \sin kx) \\ U(x) = \frac{1}{2}(\operatorname{ch} kx - \cos kx) \\ V(x) = \frac{1}{2}(\operatorname{sh} kx - \sin kx) \end{cases} \quad (8)$$

Функции S, T, U, V называются функциями А.Н. Крылова.

Найдем значения этих функций и их производных по аргументу kx до третьего порядка включительно при $x = 0$:

$$\begin{cases} S(0) = 1, S'(0) = 0, S''(0) = 0, S'''(0) = 0 \\ T(0) = 0, T'(0) = 1, T''(0) = 0, T'''(0) = 0 \\ U(0) = 0, U'(0) = 0, U''(0) = 1, U'''(0) = 0 \\ V(0) = 0, V'(0) = 0, V''(0) = 0, V'''(0) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Определитель, составленный из этих величин, равен единице. Поэтому функции Крылова называют иногда функциями с единичной матрицей, а систему (8) – нормальной или фундаментальной системой интегралов уравнений (4).

Запишем уравнение (7) и представим тригонометрические функции в системе уравнений (8) через функции Крылова:

$$\varphi(x) = AS(x) + BT(x) + CU(x) + DV(x) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \operatorname{sink}x = T - V \\ \operatorname{cosk}x = S - U \\ \operatorname{chk}x = S + U \\ \operatorname{shk}x = T + V \end{cases} \quad (11)$$

Приведем выражения последовательных производных по x от функций $S(x)$, $T(x)$, $U(x)$, $V(x)$ до четвертого порядка включительно.

	Первая производная	Вторая производная	Третья производная	Четвертая производная
$S(x)$	$kV(x)$	$k_2U(x)$	$k_3T(x)$	$k_4S(x)$
$T(x)$	$kS(x)$	$k_2V(x)$	$k_3U(x)$	$k_4T(x)$
$U(x)$	$kT(x)$	$k_2S(x)$	$k_3V(x)$	$k_4U(x)$
$V(x)$	$kU(x)$	$k_2T(x)$	$k_3S(x)$	$k_4V(x)$

Одним из преимуществ функций Крылова является то, что с помощью этих функций можно сразу написать выражение общего интеграла уравнения (4), удовлетворяющего условиям на конце $x = 0$ и содержащего только две постоянные, которые определяются из условий на другом конце $x = \ell$.

Основная задача функций Крылова. Колебания биморфного элемента, жестко закрепленного концом $x=0$ и свободное на конце $x=\ell$. Краевые условия в этом случае:

$$\begin{aligned} \varphi(0) = \varphi'(0) = 0, \\ \varphi''(\ell) = \varphi'''(\ell) = 0. \end{aligned}$$

Интеграл уравнения (4), удовлетворяющий условиям на конце $x=0$, имеет вид:

$$\varphi(x) = CU(kx) + DV(kx) \quad (12)$$

Условия на конце $x=\ell$ выражаются уравнениями:

$$\begin{cases} CS(k\ell) + DT(k\ell) = 0 \\ CV(k\ell) + DS(k\ell) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

откуда

$$S^2 - TV = 0 \quad \text{или} \quad \operatorname{ch}(k\ell)\operatorname{cos}(k\ell) + 1 = 0 \quad (14)$$

По таблицам находим первые четыре корня уравнения (14):

$$k\ell = 1.875; 4.694; 7.855; 10.996.$$

Для первых четырех собственных частот получаем по формуле (5)

$$\omega_1 = \frac{(1,875)^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \quad (15), \quad \omega_2 = \frac{(4,694)^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \quad , \quad (16)$$

$$\omega_3 = \frac{(7,855)^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \quad (17), \quad \omega_4 = \frac{(10,996)^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}} \quad , \quad (18)$$

Расчет периода колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (19)$$

с учетом формулы (19) приведет к расчету первых четырех периодов колебания биморфного элемента:

$$T_1 = \frac{2\pi}{(1,875)^2} l^2 \sqrt{\frac{\mu}{EJ}} \quad (20), \quad T_2 = \frac{2\pi}{(4,694)^2} l^2 \sqrt{\frac{\mu}{EJ}}, \quad (21)$$

$$T_3 = \frac{2\pi}{(7,855)^2} l^2 \sqrt{\frac{\mu}{EJ}} \quad (22), \quad T_4 = \frac{2\pi}{(10,996)^2} l^2 \sqrt{\frac{\mu}{EJ}}. \quad (23)$$

При иных заданных начальных параметрах можем перейти к другой форме записи собственных частот и периодов.

Запишем выражение для нахождения погонной массы для биморфного элемента:

$$\mu = \frac{m}{l}. \quad (24)$$

Учитывая формулы для вычисления массы $m=\rho V$ и объема $V=bh\ell$, получим выражение для погонной массы:

$$\mu = \rho bh. \quad (25)$$

Момент инерции прямоугольного сечения определяется из известного выражения:

$$J = \frac{bh^3}{12}. \quad (26)$$

Стандартное выражение для вычисления первых четырех собственных частот выглядит согласно формулам (15-18).

Подставляя в (15-18) вместо величин E , μ и J (25) и (26), имеем следующие выражения для определения первых четырех частот биморфного элемента:

$$\omega_1 = \left(\frac{1,007}{l}\right)^2 h \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (27), \quad \omega_2 = \left(\frac{2,522}{l}\right)^2 h \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (28)$$

$$\omega_3 = \left(\frac{4,220}{l}\right)^2 h \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (29), \quad \omega_4 = \left(\frac{5,908}{l}\right)^2 h \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (30)$$

Учитывая выражение (19), получим окончательный вид первых четырех периодов колебаний биморфного элемента:

$$T_1 = \frac{2\pi l^2}{1,007^2 h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (31), \quad T_2 = \frac{2\pi l^2}{2,522^2 h} \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (32)$$

$$T_3 = \frac{2\pi l^2}{4,220^2 h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (33), \quad T_4 = \frac{2\pi l^2}{5,908^2 h} \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (34)$$

В зависимости от заданных физико-механических параметров биморфного элемента и величин, требуемых при расчете результатов, разработчик может пользоваться как формулами (15-18), (20-23), так и (27-30), (31-34).

Уравнение i -ой собственной формы составляем следующим образом.

Из первого или второго уравнения (13) находим, подставив туда $k_i \ell$, значение отношения

$$\frac{D}{C} = -\frac{S(k_i l)}{T(k_i l)} = -\frac{V(k_i l)}{S(k_i l)}. \quad (35)$$

Подставив это значение в уравнение (12), получим

$$\varphi_i(x) = C \left| U(k_i x) - \frac{S(k_i l)}{T(k_i l)} V(k_i x) \right| = \left| U(k_i x) - \frac{V(k_i l)}{S(k_i l)} V(k_i x) \right|. \quad (36)$$

На Рис. 2 представлены первые три формы поперечных колебаний биморфного элемента.

Для формирования квантовых точек на подложке могут использоваться и другие пьезомеханические системы. Одно из устройств формирования квантовых точек из газовой фазы, в котором превалирует роль продольных колебаний пьезопривода, представлено на Рис. 3.

Устройство формирования квантовых точек (Рис. 3) из газовой среды, содержит неподвижное основание 1, установленный на нем пьезопривод 2 с зондом 3, электрически связанным с подложкой 4, установленной на подложкодержателе 5, источник

гармонических колебаний напряжения 6, соединенный с зондом 3 и подложкой 4, подложкодержатель 5 выполнен с возможностью подачи внутрь полости 7 подложкодержателя 5 жидкого азота от источника жидкого азота 8.

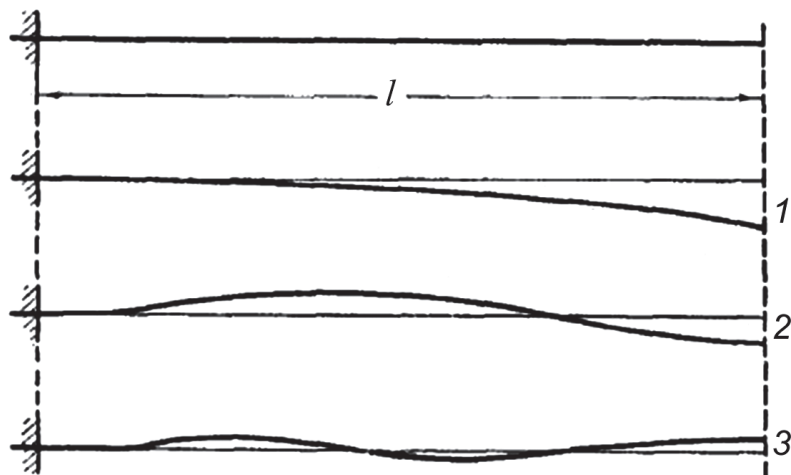


Рис. 2. Формы поперечных колебаний биморфного элемента.

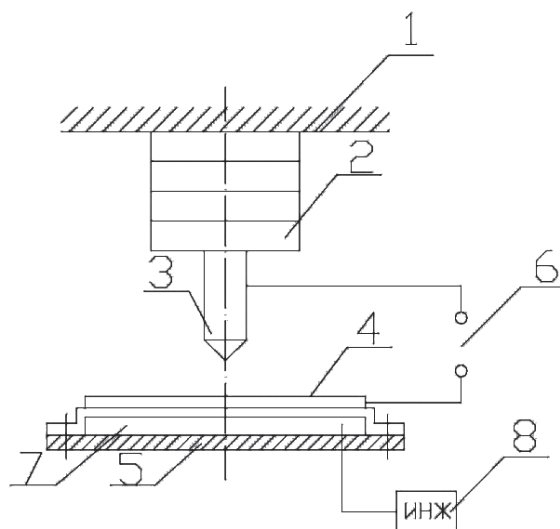


Рис. 3. Устройство формирования квантовых точек из газовой среды.

Устройство для формирования квантовых точек из газовой среды работает следующим образом.

При перемещении зонда 3 посредством пьезопривода 2 относительно подложки 4 источник гармонических колебаний напряжения 6 посылает импульсы между зондом 3 и подложкой 4, в результате чего формируются квантовые точки из газовой среды, окружающей пространство между зондом 3 и подложкой 4. В это время происходит охлаждение подложки 4 путем подачи жидкого азота от источника жидкого азота (ИЖА) 8 в герметичную полость 7 внутри подложкодержателя 5, что приводит к уменьшению интенсивности процесса испарения материала с поверхности подложки 4 и его дрейфа.

На процесс формирования квантовых точек существенное влияние оказывает резонанс, возникающий в пьезоприводе.

Уравнения продольных колебаний биморфного элемента мы получим как необходимые условия экстремума функционалов:

$$S_1 = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \int_0^l \left[\mu(x) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 - ES \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 - Qy \right] dx dt \quad (37)$$

Интегралы по x , взятые в пределах от 0 до l (l - ширина биморфного элемента) от первого и двух последних слагаемых в квадратных скобках, представляют собой соответственно кинетическую и потенциальную энергию рассматриваемой системы.

Необходимое условие экстремума функционала S_1 будет иметь вид:

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ES \frac{\partial y}{\partial x} \right] = Q(x, t) \quad (38)$$

Условие (2) будет уравнением продольных колебаний.

Когда $Q(x, t) \equiv 0$ и жесткость ES биморфного элемента постоянна по всей ширине биморфного элемента, то уравнение свободных колебаний однородного биморфного элемента имеет вид уравнения (1), где $c^2 = \frac{ES}{\mu}$.

Уравнение собственных форм продольных колебаний будет иметь форму:

$$\varphi''(x) + a^2 \varphi(x) = 0, \quad (39)$$

где

$$a^2 = \frac{\omega^2 \mu}{ES}.$$

Задача о собственных формах и частотах колебаний приводится к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами.

Частоты главных колебаний стержня образуют бесконечный дискретный ряд значений. Перенумерованные в порядке возрастания они вместе с порядковым номером растут до бесконечности.

Рассмотрим продольные колебания биморфного элемента с одним жестко закрепленным ($x=0$) и другим ($x=l$) свободным концами.

В этом случае краевые условия выражаются равенствами:

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi'(l) = 0.$$

Из этих условий находим значения постоянных B и D общего решения

$$\varphi(x) = B \cos ax + D \sin ax.$$

Имеем:

$$B = 0, \quad D \cos al = 0.$$

Постоянная D не может, очевидно, равняться нулю, так как в противном случае $\varphi(x) \equiv 0$. Нетривиальное решение получится при условии

$$\cos al = 0, \quad (40)$$

$$(al = -\frac{\pi}{2} + \pi k)$$

Из условия (40) находим:

$$a_k = \frac{(2k-1)\pi}{2l}; \quad \omega = \frac{(2k-1)\pi}{2l} \sqrt{\frac{ES}{\mu}} \quad (k=1, 2, 3...) \quad (41)$$

Таким образом, уравнение (40) отбирает собственные значения параметра a и вместе с тем определяет собственные частоты системы. Оно называется характеристическим уравнением или уравнением частот и соответствует вековому уравнению систем с конечным числом степеней свободы.

Учитывая (19) и (41), получим выражение для определения периода колебаний биморфного элемента:

$$T = \frac{4l}{2k-1} \sqrt{\frac{\mu}{ES}}. \quad (42)$$

Характеристическое уравнение или уравнение частот можно получить в другом виде.

Определим площадь поверхности полого цилиндрического биморфного элемента:

$$S = \pi(R^2 - r^2) \quad (43)$$

Учитывая формулы для вычисления массы $m = \rho V$ и объема $V = \ell \pi (R^2 - r^2)$, получим выражение для погонной массы:

$$m = \pi \rho (R^2 - r^2) \quad (44)$$

Стандартное выражение для вычисления частоты колебаний выглядит согласно формуле (6).

Подставляя в (41) вместо величин E , S и μ (43) и (44), имеем следующее выражение для определения частоты колебаний биморфного элемента:

$$\omega = \frac{(2k-1)\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (45)$$

Величина, обратная частоте:

$$\frac{1}{\omega} = \frac{2l}{(2k-1)\pi} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (46)$$

Учитывая выражения (19) и (44), получим окончательный вид уравнения периода колебаний биморфного элемента:

$$T = \frac{4l}{2k-1} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (47)$$

Разработчику можно пользоваться при расчетах формулами (19), (41), (45) и (47), в зависимости от заданных физико-механических параметров биморфного элемента и величин, которые необходимо рассчитать.

Применение предлагаемого устройства возбуждения кантилевера (Рис. 1) позволяет расширить функциональные возможности устройства за счет использования схемы генератор магнитных колебаний – магнитная нанопластинка,.

Применение предлагаемого устройства формирования квантовых точек из газовой среды (Рис. 3) позволяет создавать квантовые точки с заданными промежутками между ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейник А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. - М.: Металлургия, 1965. - 375 с.
2. Бабаков А.И. Теория колебаний. – М.: Наука, 1965. – 559 с., ил, стр. 233-235, 254-257.
3. Ивашов Е.Н., Князева М.П., Степанчиков С. В. Устройство возбуждения кантилевера. – Пат. РФ на ПМ №125348. – Оpubл. 27.02.2013. – Бюл. №6.
4. Ивашов Е.Н., Князева М.П., Гамилова Т.П. Модель формирования нанорисунка на подложке с учетом двух внутренних степеней свободы. – Материалы МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного машиностроения». – 4-7 декабря 2012 г. – INTERMATIC-2012, часть 3. – М.: МИРЭА. – 2012. стр. 101-103.
5. Ивашов Е.Н., Князева М.П., Степанчиков С.В. Пьезоэлектрические сканирующие элемент зондовых микроскопов и нанотехнологического оборудования. – Материалы МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного машиностроения». – 4-7 декабря 2012 г. – INTERMATIC-2012, часть 4. – М.: МИРЭА. – 2012. стр. 78-82.