

шенной температуре).

Геометрическая стабильность конструкции достигается использованием материалов, обладающих высокими удельными механическими характеристиками (углепластик).

Устойчивость к внешним воздействиям в условиях орбитальной эксплуатации (радиационное воздействие, ультрафиолетовое излучение) в течение заданного срока эксплуатации обеспечивается выбором материалов с соответствующими характеристиками.

В защите от радиации также может участвовать несущая конструкция аппарата, но интегральная толщина экрана из алюминия при этом должна составлять не более 2 – 4 мм, особенно при использовании трехслойных сотовых панелей. Увеличение плотности компоновки аппарата и размещение критичных к радиации приборов за экраном из не критичных, например, аккумуляторных батарей, может довести интегральную толщину экрана для самых критичных приборов до необходимых 10 – 15 мм.

Точность съёмки поверхности Земли определяется тем как установлена оптико-электронная система (ОЭС) в целом, а также системы ориентации и стабилизации, которые при компоновке целесообразно размещать на одной установочной плате [3].

Для обеспечения установленного теплового режима ОЭС, её необходимо заглубить в приборный блок МК, чтобы он обеспечивался сред-

ствами как самой системы, так и средствами МК.

На торцевой поверхности корпуса МК рекомендуется располагать приборы с большим энергопотреблением, например датчики (передатчики) целевой информации.

Таким образом, на МК оказывает влияние значительное количество различных факторов: механические, климатические, космический вакуум, невесомость, радиация. Поэтому конструкция МК должна обеспечивать достаточную стабильность работы целевой аппаратуры, а компоновка приборов МК необходимо осуществлять с учётом подверженности влиянию факторов космического пространства.

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. – М.: ФГУП ЦНИИМАШ. 2006. – 72 с.
2. Даниев, Ю.В. Космические летательные аппараты / Ю.В. Даниев, А.В. Демченко, В.С. Зевако, А.М. Кулабухов, В.В. Хуторный // Введение в космическую технику. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС. 2007.
3. Патент: RU 2457157. В64G1/10. Микроспутник для дистанционного зондирования поверхности земли. ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». Абалихин О.Ю., Блинов В.Н. и др. Заявлен: 07.12.2010. Опубликовано: 27.07.2012.

УДК 537.634.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТАНОВОК ПРИСОЕДИНЕНИЯ ВЫВОДОВ МЕТОДАМИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ МАТРИЦ

Степаненко Д.А., Богданчук К.А., Минченя В.Т.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Ультразвуковая микросварка широко используется в микроэлектронике для формирования электрических проволочных выводов полупроводниковых микросхем [1]. В настоящее время ГНПО «Планар» выпускает ряд моделей ручных и автоматических ультразвуковых установок присоединения выводов, позволяющих формировать выводы из золотой и алюминиевой проволоки. Однако в связи с несовершенством существующих методов расчета сложных ультразвуковых колебательных систем технологического назначения проектирование волноводных систем установок присоединения выводов требует выполнения значительного объема опытно-конструкторских работ. В данной работе рассматривается возможность упрощения процесса проектирования волноводных систем установок присоединения выводов путем применения методов конечных элементов и передаточных мат-

риц.

В качестве объекта исследования была выбрана волноводная система установки присоединения выводов ЭМ-4320, чертеж и фотография которого приведены на рисунке 1.

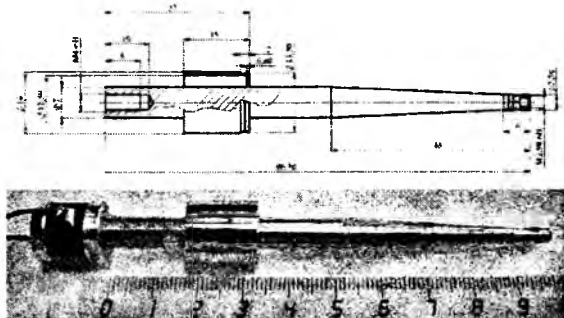


Рисунок 1 – Волновод установки присоединения выводов ЭМ-4320 (на фотографии показан в сборе с преобразователем Ланжевена)

Сварка производится с помощью твердосплавного инструмента, который крепится с помощью винта в поперечном отверстии, выполненном на конце волновода. Крепление волновода на установке производится с помощью стакана, выполненного в узловой точке амплитуды колебательных смещений. Волновод также имеет наклонное отверстие для подачи проволоки, наличие которого с целью упрощения модели не учитывалось. Резонансная частота продольных колебаний изображенного на рисунке 1 волновода составляет 102 кГц.

Моделирование волновода методом конечных элементов выполнялось с помощью программы ANSYS. Трехмерная геометрическая модель волновода, созданная с помощью SolidWorks, импортировалась в ANSYS в виде текстового файла ParaSolid с расширением .x_t. В связи с симметричностью геометрической модели рассматривалась ее половина с наложением симметричных граничных условий на плоскость разреза. В такой геометрической модели возможны два вида собственных форм колебаний: продольные и изгибные с направлением колебательных смещений, параллельным плоскости симметрии. Для разбиения геометрической модели на конечные элементы использовались 10-узловые тетраэдрические элементы типа SOLID92. Свойства материала волновода были заданы соответствующими стали ШХ15: плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 2,029 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ (скорость продольной стержневой волны $c = 5100 \text{ м/с}$), коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. В связи с наличием большого количества собственных частот, соответствующих изгибным колебаниям, при модальном анализе рассматриваемой модели необходимо было задавать достаточно узкий диапазон анализируемых частот, например, от 100 кГц до 110 кГц. В диапазонах частот шириной 10 кГц наблюдалось до 4 собственных частот, большинство из которых соответствовали изгибным колебаниям. При этом наблюдались как изгибные колебания, локализованные преимущественно в рабочей части волновода, так и изгибные колебания, локализованные в крепежном стакане. В результате анализа в диапазоне частот 100..110 кГц была найдена одна собственная частота, соответствующая продольным колебаниям. Значение этой частоты составило 107,1 кГц, то есть отклоняется от экспериментального значения 102 кГц на 5 %. Погрешность вероятнее всего вызвана неточным заданием свойств материала при моделировании и находится в пределах, допустимых для инженерных расчетов. На рисунке 2 приведена расчетная эпюра распределения амплитуды продольных колебательных смещений вдоль оси волновода. Как видно из эпюры, собственная форма колебаний, соответствующая частоте 107,1 кГц, характеризуется наличием 4

узловых точек.

Как видно из рисунка 1, фланец с крепежным стаканом выполнен в сечении с осевой координатой 0,033 мм, что примерно соответствует узловой точке эпюры с координатой 0,035 м.

Помимо моделирования методом конечных элементов также было выполнено моделирование волновода с помощью метода передаточных матриц [2]. Расчетное значение собственной частоты, соответствующей 4-й моде продольных колебаний, составило 105,5 кГц, то есть отклоняется от экспериментального значения 102 кГц на 3,4 %.

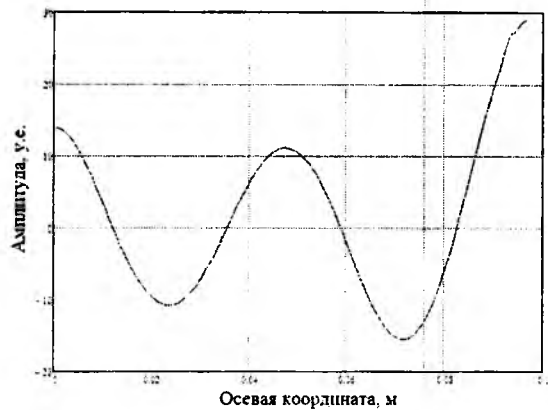


Рисунок 2 – Эпюра распределения амплитуды продольных колебательных смещений вдоль оси волновода

Таким образом, рассмотренные методы моделирования волноводной системы дают значения собственной частоты продольных колебаний, совпадающие с достаточной для инженерных расчетов точностью с экспериментальными значениями. Метод передаточных матриц в случае необходимости также позволяет решать задачи синтеза волноводных систем, то есть определения значений геометрических параметров, обеспечивающих резонанс продольных колебаний на заданной частоте. В качестве направления дальнейших исследований представляет интерес экспериментальное исследование распределения амплитуды продольных колебаний по длине волновода и сравнение полученных данных с результатами моделирования. В связи с наличием у стали ШХ15 ферромагнитных свойств для измерения амплитуд колебаний в волноводе могут использоваться датчики на основе эффекта обратной магнитострикции [3].

1. Колешко, В. М. Ультразвуковая микросварка / В.М. Колешко. – Мн.: Наука и техника. – 1977. – 328 с.
2. Степаненко, Д.А. Исследование продольных колебаний гибких ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, Н.Т. Мин-

- ченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71-75.
3. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах

с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 6. – С. 72-78.

УДК 621.382.002

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩИХ СЛОЕВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ CuInGaSe_2

Телеш Е.В., Черняк О.С., Достанко А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Солнечная энергетика наряду с другими видами возобновляемых источников энергии приобретает в мире все большую востребованность. При производстве солнечных элементов применяются различные технологии. При этом основные преимущества той или иной технологии, в основном, определяются двумя параметрами – эффективностью преобразования световой энергии в электрическую и себестоимостью производства. Лидером по эффективности среди тонкопленочных СЭ является технология CIGS (на основе соединения $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_x$) [1]. Использование ионно-лучевого распыления является перспективным для формирования поглощающих слоев тонкопленочных солнечных элементов из CuInGaSe_2 . Это объясняется преимуществами ионно-лучевых систем: пространственное разделение областей генерации плазмы и области конденсации материала, более высокая чистота плёнок из-за снижения степени рабочего вакуума, минимальное воздействие вторичных электронов на подложку [2].

К поглощающим слоям тонкопленочных солнечных элементов предъявляются следующие требования:

- толщина слоя: 1–2 мкм;
- тип проводимости слоя – акцепторный;
- поликристаллическая структура;
- размер зерна 1–1,5 мкм;
- высокое поглощение на длине $\lambda=1,5$ мкм;
- гомогенный состав с соотношением $\text{Me}/\text{Se}=1$.

Чтобы реализовать эти требования необходимо осуществить нанесение поглощающего слоя с высоким повторением стехиометрии состава монокристаллической мишени и получить необходимую структуру слоя.

Пленки CIGS наносили на модернизированной вакуумной установке Z-400 фирмы Leybold-Heraeus. Для формирования поглощающего слоя использовалась монокристаллическая синтезированная мишень из CuInGaSe_2 диаметром 22 мм. Объемные кристаллы соединения CuInGaSe_2 выращивали направленной кристаллизацией расплава в вертикальной однозонной

печи (вертикальный метод Бриджмена). Исходными веществами являлись медь, индий, галлий и селен чистотой > 99.999%. Рабочим газом служил аргон. Поглощающие слои толщиной 0,25–1,0 мкм наносились на подложки из стекла, стекла с тыльным контактом из молибдена и кварца при температуре 40 – 400 °С. В таблице 1 приведен состав пленок, полученный при разных температурах подложки.

Таблица 1 – Состав пленок CuInGaSe_2

№	$T_n, ^\circ\text{C}$	Cu, %	In, %	Ga, %	Se, %
1	270	16,63	25,23	5,96	52,19
2	50	18,68	22,18	6,75	52,39
3	300	19,07	23,72	6,99	50,22
4	400	21,30	27,68	7,02	44,00
5	300	20,47	24,96	7,43	47,14
6	150	18,61	24,46	7,32	49,61
7	50	18,91	23,20	6,48	51,40

При $T_n \geq 400^\circ\text{C}$ происходит потеря селена. На рисунке 1 приведены рентгенограммы пленок на стекле, полученных при разных температурах подложки. Установлено, что повышение температуры улучшает структуру пленок CuInGaSe_2 , что выражается в значительном увеличении интенсивности пиков (112) и (220).

Рамановская спектроскопия пленок показала, что покрытия обладают структурой халькопирита, о чем свидетельствует ярко выраженный пик на частоте 175 см^{-1} . Повышение температуры подложки приводит к формированию более выраженной структуры халькопирита (рисунок 2).

Удельное сопротивление неоднозначно зависело от температуры подложки и составило $(2,3 - 42,5) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 40°C , $0,44 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 270°C и $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 300°C . Стоит отметить, что тип проводимости у свеженанесенных образцов был электронного типа. Отжиг образцов осуществлялся при 550°C в течение 30–40 мин под пленкой Se толщиной 1,5–2,0 мкм. Отжиг способствовал появлению р-типа проводимости, как для стеклянных, так и для кварцевых подложек. Отжиг приводил к дальнейшему росту