

Новые методы создания элементов вакуумных СВЧ-приборов на основе технологии 3D-печати

М.В. Морозкин, М.Д. Проявин, В.Е. Котомина

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в данной работе описываются новые технологические методы создания металлизированных и полностью металлических элементов, пригодных для использования в вакуумных СВЧ-приборах. Форма поверхности задаётся пластиковой оправкой, изготавливаемой на 3D-принтере, а проводимость обеспечивается с помощью химической металлизации пластика или заливки оправки легкоплавким сплавом. Для обеспечения более толстого медного покрытия используется дальнейшая гальванизация. Разработанные методы обеспечивают высокую точность, качество поверхности и малое время изготовления при существенно меньшей стоимости по сравнению с традиционными.

Ключевые слова: 3D-печать, фотополимер, металлизация, омеднение, гальваника, периодическая структура, СВЧ-компоненты

1. Введение

Современные методы изготовления СВЧ-приборов являются довольно сложными и затратными. Для изготовления рабочего макета требуется разработать конструкторскую документацию, закупить дорогостоящие материалы (прокат бескислородной меди, керамические изоляторы и т.п.). Если поверхность элементов СВЧ прибора имеет сложную форму, как, например, волновод с двумерной периодической гофрировкой, то для изготовления требуются дорогостоящие станки и квалифицированный персонал. В результате путь от рассчитанного прибора до воплощения его в металле занимает, как правило, месяцы и требует большого финансирования.

Актуальной является задача быстрого и недорогого изготовления СВЧ-приборов или макетов, пригодных для экспериментальной проверки теоретических расчетов и компьютерных моделей.

Мы предлагаем набор технологических методов, с помощью которых можно изготавливать элементы СВЧ-приборов достаточно быстро и недорого, при этом точность изготовления составляет порядка десяти микрон, а качество рабочей поверхности соответствует требованиям высокочастотных приложений [1].

2. Создание элементов сложной формы с помощью 3D-печати

Для изготовления компонентов СВЧ-устройств мы предлагаем использовать 3D-печать методом стереолитографии – печать изделий путем полимеризации фотополимерных смол при ультрафиолетовом облучении. Печать осуществляется послойно, формирование каждого слоя задаётся с помощью УФ-источников высокого разрешения. Данный метод характеризуется высокой скоростью построения изделий сложной формы. Характерная толщина слоя – около 10 мкм, разрешение печати слоя – порядка 50 мкм. Скорость печати – около 10 мм в час.

Таким образом, мы можем достаточно точно и быстро напечатать элемент СВЧ-прибора требуемой формы, однако материал его будет диэлектрическим. Для обеспечения проводимости поверхности образца её предлагается металлизировать

(омеднить). Известный метод магнетронного напыления может обеспечить хорошее качество покрытия, он хорошо работает для открытых поверхностей, но слабо применим для металлизации внутренних участков образцов сложной формы. Химическая металлизация позволяет создать не менее качественное покрытие, в том числе на труднодоступных внутренних поверхностях элементов сложной геометрии.

Как альтернативу предлагаемому подходу можно рассмотреть 3D-печать непосредственно металлами по технологиям SLS или SLM [2], однако установки для такой печати, во-первых, стоят на пару порядков дороже и, во-вторых, не обеспечивают требуемого качества поверхности, т.е. распечатанные образцы нуждаются в постобработке.

3. Химическая металлизация фотополимерного пластика

Процесс химической металлизации пластика не может пройти без ряда подготовительных операций, без которых качественно нарастить металл будет невозможно [3]. Нужно создать на поверхности детали поверхностный слой, который обеспечит хорошую адгезию металл – диэлектрик. Она создается серией подготовительных операций, таких как обезжиривание и микротравление поверхности. Одной из ключевых проблем при подготовке детали перед металлизацией была невозможность проведения стандартной серии операций декапирования, обезжиривания и микротравления. Это обусловлено сравнительно небольшими технологическими допусками при работе с полиакрилатами. В соответствии с паспортом использованного нами материала Visijet Crystal EX 200 мы должны были скорректировать температурный диапазон используемых рабочих растворов в пределах 20- 50⁰С, не применять в работе концентрированные кислотные и щелочные растворы (см. табл. 1).

Таблица 1. Свойства используемого фотополимера

Физическое состояние	мягкий или пастообразный материал
Цвет	бесцветный
Запах	слабый
Диапазон температуры плавления(°С)	от 55 до 65
Температура вспышки (°С)	> 93
Плотность (г/см³)	1.1
Динамическая вязкость (мПа/с)	13 (при 80 °С)
Нежелательные условия	Не допускать воздействия тепла и света на материал. Принимать необходимые меры по предотвращению статических электрических разрядов
Нежелательные материалы	Окисляющие материалы, сильнодействующие кислоты и сильнодействующие щелочи

Химическая металлизация проходит в несколько этапов. Первоначальное обезжиривание проводилось в растворе гидроксида калия в течение 3-5 минут при температуре 45–50 °С. Далее деталь промывалась дистиллированной водой и погружалась в раствор микротравления поверхности, содержащий CrO₃ и H₂SO₄, на 30 секунд при температуре 20 °С. Микротравление поверхности диэлектрика вводится в стадии предварительной подготовки для создания микрошероховатостей в поверхностном слое для последующего лучшего сцепления ионов металла-активатора с матрицей полимера.

После проведения мы промываем деталь дистиллированной водой и обезвреживаем поверхность слабым раствором соляной кислоты. На данном этапе улавливаются остатки окислов хрома и окисленные остатки полимера с поверхности

пластика.

Далее мы использовали классическую методику сенсбилизации раствором хлористого олова с последующей активацией подготовленной поверхности хлористым палладием. Каталитически активные частицы палладия распределяются по поверхности нашего изделия. Дальнейшее замещение металлического палладия на металлическую медь происходит в растворе химического меднения. Первоначально процесс идет как образование мелких частиц меди на поверхности катализатора (палладия), далее процесс приобретает автокаталитический характер из-за каталитической активности самой меди. Время меднения составляет 15–30 мин. Толщина сплошного покрытия слоем меди, осажденной химическим способом, составляет 0.5–0.8 мкм.

Такой слой слишком тонок и быстро окисляется на воздухе, поэтому далее толщину покрытия мы увеличивали с помощью электрохимического осаждения меди. Электролитическое меднение проводилось при средней плотности тока 1.5-2 А/дм². Скорость осаждения меди, в среднем, составляла 3-4 мкм за 15 мин.

Таким образом, полное время нанесения медного покрытия толщиной около 10 мкм – чуть больше часа, а полный цикл изготовления элемента с омедненной поверхностью размером порядка десяти сантиметров – один день. Подобные элементы могут быть использованы для «холодных» измерений, а также непосредственно устанавливаться в системы с малой мощностью. Такое покрытие было успешно экспериментально испытано на вакуумную стойкость: цилиндр с фланцами KF40 был с одной стороны заглушен, с другой – подключен к откачному посту. За короткое время был достигнут вакуум на уровне 10⁻⁵ Торр. Также отметим, что малая толщина слоя металла может быть актуальной в системах с импульсным магнитным полем, обеспечивая, с одной стороны, прохождение СВЧ-излучения и, с другой стороны, минимальное ослабление импульсного магнитного поля (ИМП) и минимизацию сил, действующих на элемент СВЧ-прибора со стороны ИМП. Примеры изготовленных предлагаемым методом элементов представлены на рис. 1.



Рисунок 1. Пример СВЧ-компонентов из омеднённого химическим путем фотополимера: высокочастотный волновод (поперечный размер канавки 0.5x0.5 мм) – слева; испытание на вакуумную стойкость цилиндра с фланцами KF40 – справа.

4. Изготовление массивных медных компонентов.

Во многих СВЧ-приборах пластиковой детали с металлизированной поверхностью недостаточно для обеспечения требований на прочность конструкции, устойчивость к высоким температурам и бомбардировке энергичными заряженными частицами. В этом случае перспективным методом представляется наращивание толстого (миллиметры) медного покрытия методом электролитического меднения с последующим удалением пластиковой оправки, которая в этом случае служит только

для задания формы изделия. Данным способом можно изготовить полноценные СВЧ-компоненты сложной формы, пригодные для использования в вакуумных приборах с большой мощностью СВЧ-излучения. На рис. 2 приведены фотографии круглого волновода с двумерной синусоидальной гофрировкой. Толщина поверхности – около 2 мм, масштаб гофрировки – 5 мм. Время изготовления подобного компонента составляет одну – две недели.



Рисунок 2. Цилиндрический резонатор с двумерной периодической структурой.

Достоинством данного метода является возможность наращивания металла практически любой толщины, причем получаемая деталь является вакуумно-стойкой. К недостаткам можно отнести сравнительно большой время изготовления, а также то, что стопроцентного повторения формы фотополимера можно добиться только с одной стороны элемента. Кроме того, удаление пластиковой оправки в данном случае сопряжено с рядом трудностей: химическая стойкость фотополимеров и их высокая адгезия к медной части детали. Однако, разработанный алгоритм удаления фотополимера (ноу-хау) позволяет успешно извлекать пластиковые заготовки из наращённых деталей.

5. Изготовление массивных элементов методом заливки легкоплавким сплавом.

Преодолеть указанные выше недостатки можно, используя печатную пластиковую деталь, как двустороннюю оправку для заливки в нее легкоплавкого металлического сплава. Мы использовали для заливки сплав Розе, он существенно более удобен в работе, чем сплав Вуда из-за нетоксичности. После застывания сплава оправка удаляется. Такой метод позволяет задать форму поверхности сразу с обеих сторон изделия. Для придания дополнительной прочности поверхность также может быть омеднена гальваническим способом.

Преимущества данного способа – малое время изготовления массивных деталей. Компоненты легко омеднить, а также легко можно удалить ненужный сплав, если необходима только наращенная на него медная деталь. Сплав можно использовать

повторно. Однако существуют технические сложности с заполнением мелких полостей, например, остаточными пузырьками воздуха. Данные проблемы вполне решаемы корректным выбором технологического процесса.

Пример заготовки для изготовления резонатора из п. 4, аналогичного по форме изображенному на рис 2., приведен на рис. 3. В дальнейшем, на данной заготовке будет гальванически наращен толстый слой меди, а сплав Розе – удален в кипящей воде.



Рисунок 3. Заготовка для цилиндрического резонатора с двумерной периодической структурой.

6. Заключение

Предложенные подходы к созданию СВЧ-компонентов с использованием аддитивных технологий и различных методов металлизации успешно протестированы и могут быть использованы как для изготовления прототипов для «холодных» измерений и изготовления маломощных СВЧ-устройств, так и, в будущем, для создания полноценных СВЧ-приборов. Перспективным видится частичная металлизация фотополимерных заготовок, части которых представляют собой систему электродов, электродинамических элементов и изоляторов, при этом обеспечивая вакуумную стойкость.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00884)**.

Список литературы

1. Proyavin, M.D., Vikharev, A.A., Fedotov, A. *et al.* Development of Electrodynamical Components for Microwave Electronic Devices Using the Technology of 3D Photopolymer Printing with Chemical Surface Metallization. *Radiophys Quantum El* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10072-0>.
2. K. Kotzé and J. Gilmore, "SLM 3D-Printed Horn Antenna for Satellite Communications at X-band," 2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Granada, Spain, 2019, pp. 148-153, doi: 10.1109/APWC.2019.8870367.
3. Ильин В.А. "Металлизация диэлектриков". Машиностроение, 80с, 1977г.