

ТЕХНОЛОГИИ

ОПЫТ 3D-ПЕЧАТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНЫХ СВЧ-ТРАКТОВ И РУПОРНЫХ АНТЕНН ДИАПАЗОНА 8,5-31 ГГц

Текст: Александр Ермаков
Виктор Калиничев
Антон Нисан
Глеб Потапов
Елена Фролова

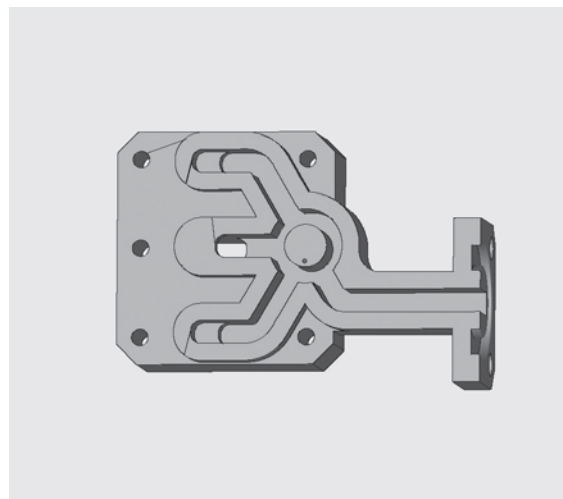


Год назад в статье «Печать металлопорошковыми композициями: возможности и перспективы применения в приборостроении»¹ мы рассказали о зарубежном опыте в данном направлении. В прошедшем году в лаборатории аддитивных технологий Центра развития технологий ООО «Остек-СМТ» появилась установка селективного лазерного сплавления Renishaw AM400 и периферийное оборудование к ней. Это дало нам возможность провести более 40 циклов печати из алюминиевого порошка: сначала из оригинального AlSi10Mg Renishaw, а с ноября – из аналогичного порошка АСП-45 производства ОК РУСАЛ. Существенную долю среди напечатанных деталей составили волноводы, фильтры, сумматоры, рупорные облучатели и другие элементы СВЧ-трактов. О некоторых из этих устройств, их электрических характеристиках в сравнении с традиционными аналогами, изготовленными механообработкой, мы расскажем в данной статье.

¹ «Вектор высоких технологий» № 2 (37) апрель 2018



1 Фотография напечатанного сумматора. Габаритные размеры 41×39×54 мм

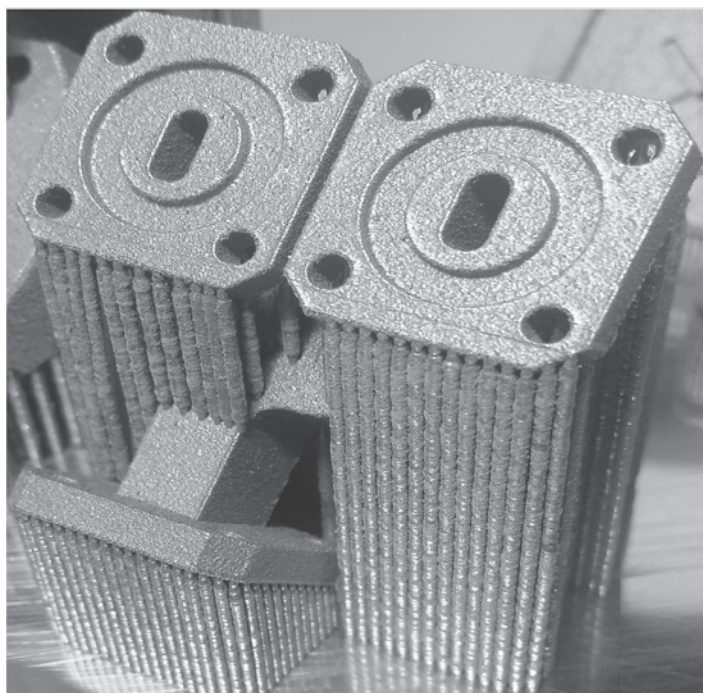


2 Форма каналов сумматора (разрез)

Сумматор

Напечатанный по заказу АО НПО ЛЭМЗ сумматор с центральной рабочей частотой 28 ГГц предназначен для радиолокационных систем. На его входы 1 и 2 подаются исходные сигналы, на выходе 3 образуется сумма сигналов, на выходе 4 – их разность (рис 1 и 2). Сложная форма каналов сумматора не позволила изготовить его механообработкой целиком: фрезеровались две детали и соединялись на винтах. А напечатать сумматор можно целиком, исключая необходимость и трудоемкость сборки.

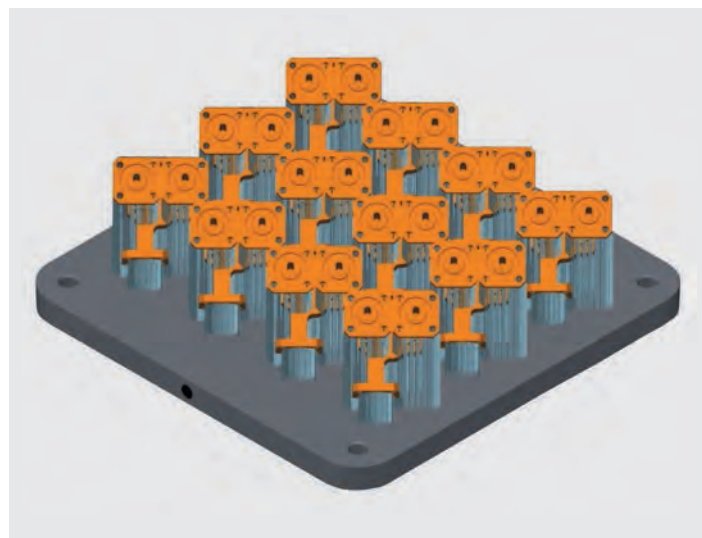
Расположение сумматора на подпорках на платформе показано на рис 3, объем самой детали



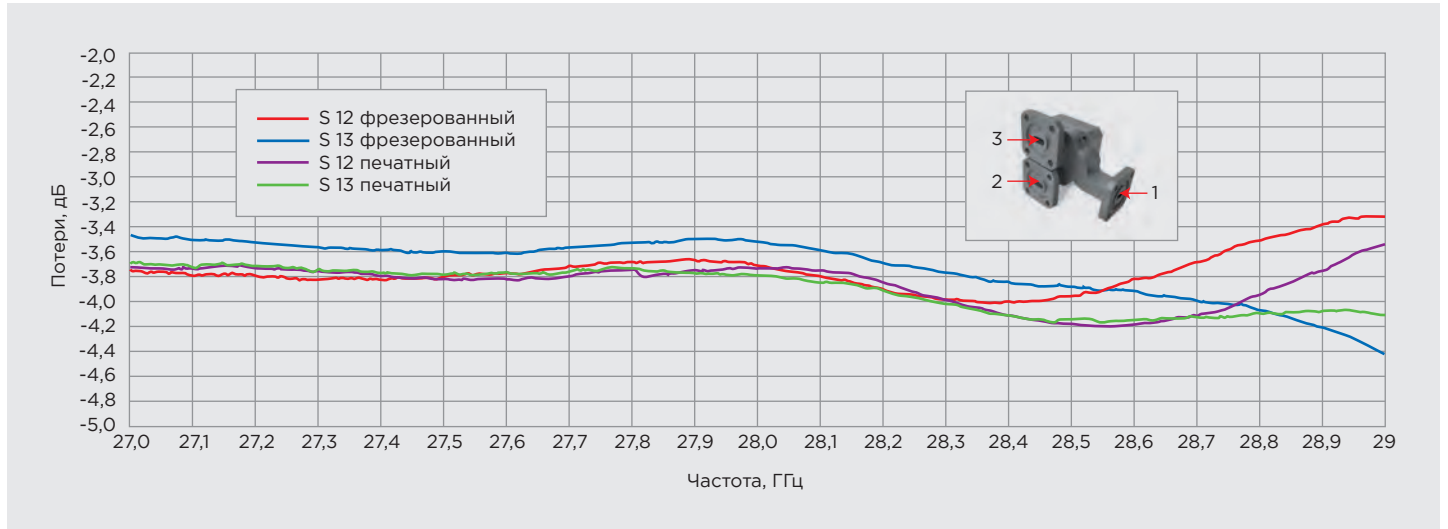
3 Сумматор с подпорками до снятия с платформы

21,3 куб. см, а поддержек к ней – 6,7 куб. см. Время печати в расчете на один сумматор при размещении 12 деталей на платформе составляет шесть часов (рис 4). Но если печатать только одну деталь, это займет девять часов. После печати проводилась термообработка для снятия напряжений (2 ч, 300 °С), снятие с поддержек, дробеструйная обработка, механическая обработка фланцев.

Каналы сумматора после печати не обрабатывались, шероховатость их стенок примерно Ra 20 мкм, что, конечно, существенно выше типовых для волноводных трактов значений 1,6, 0,8 или даже 0,4 мкм. Тем не менее, результаты измерений электрических характеристик, выполненных заказчиком, свидетельствует о соответствии напечатанного сумматора предъявляемым требованиям:

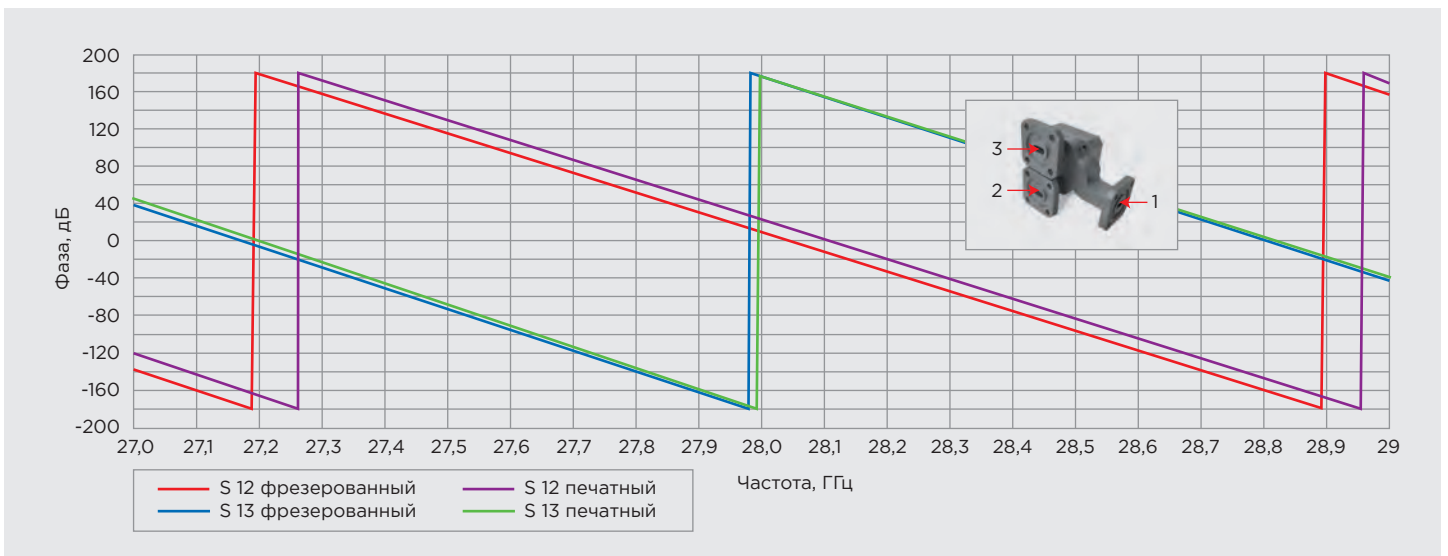


4 Размещение 12 сумматоров на платформе в ПО для подготовки программ Renishaw QuantAM



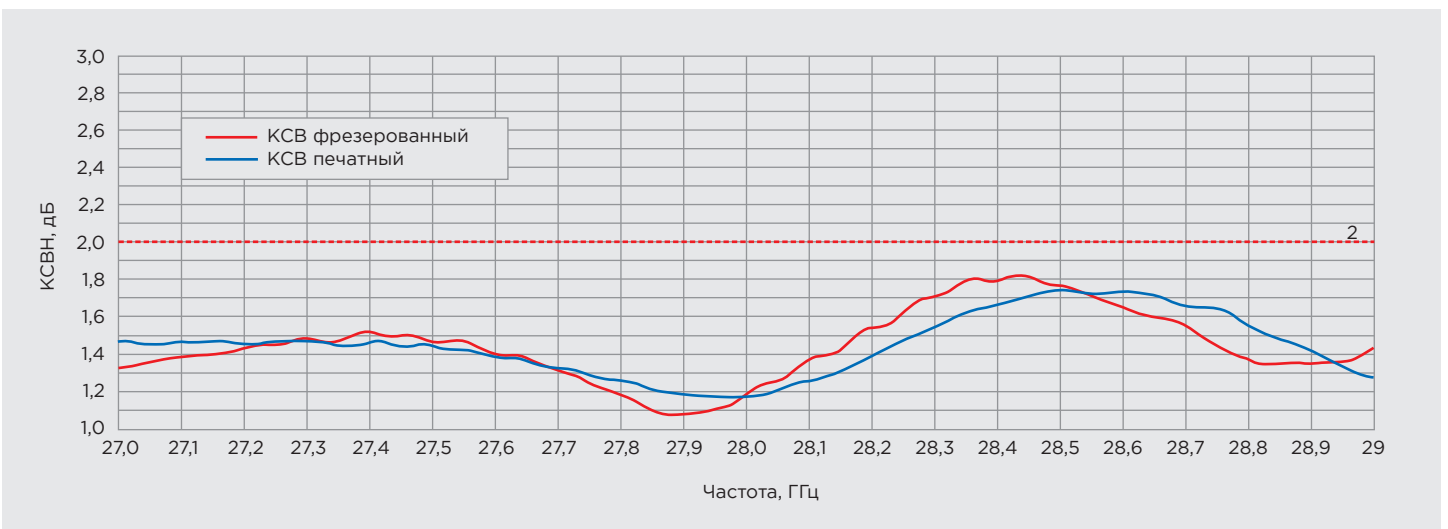
5

Амплитудный баланс фрезерованного и напечатанного сумматоров



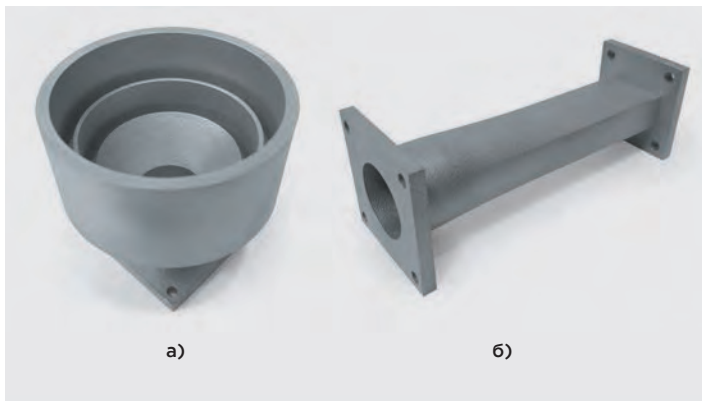
6

Фазовый баланс фрезерованного и напечатанного сумматоров



7

Коэффициент стоячей волны фрезерованного и напечатанного сумматоров



8 Рупорный облучатель (а), габариты 79×79×82 мм и плавный переход с круглого на прямоугольный волновод (б), габариты 45×46×125 мм

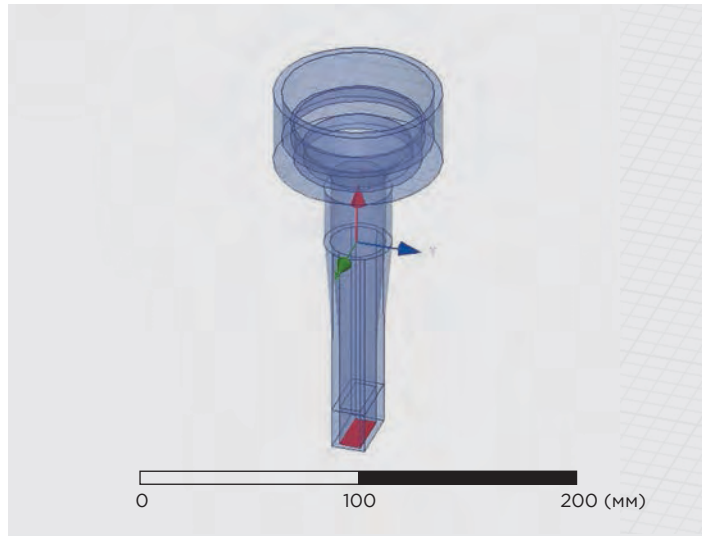
- коэффициенты передачи S12 и S13 фрезерованного и напечатанного сумматоров близки и различаются на уровне погрешности измерения (рис 5);
- разность фаз сигналов на выходах 2 и 3 близка к 180° как для напечатанного, так и для фрезерованного сумматоров (рис 6);
- на центральной частоте коэффициенты стоячей волны фрезерованного и напечатанного сумматоров практически совпадают и не превышают 1,2.

Рупорный облучатель зеркала радиотелескопа

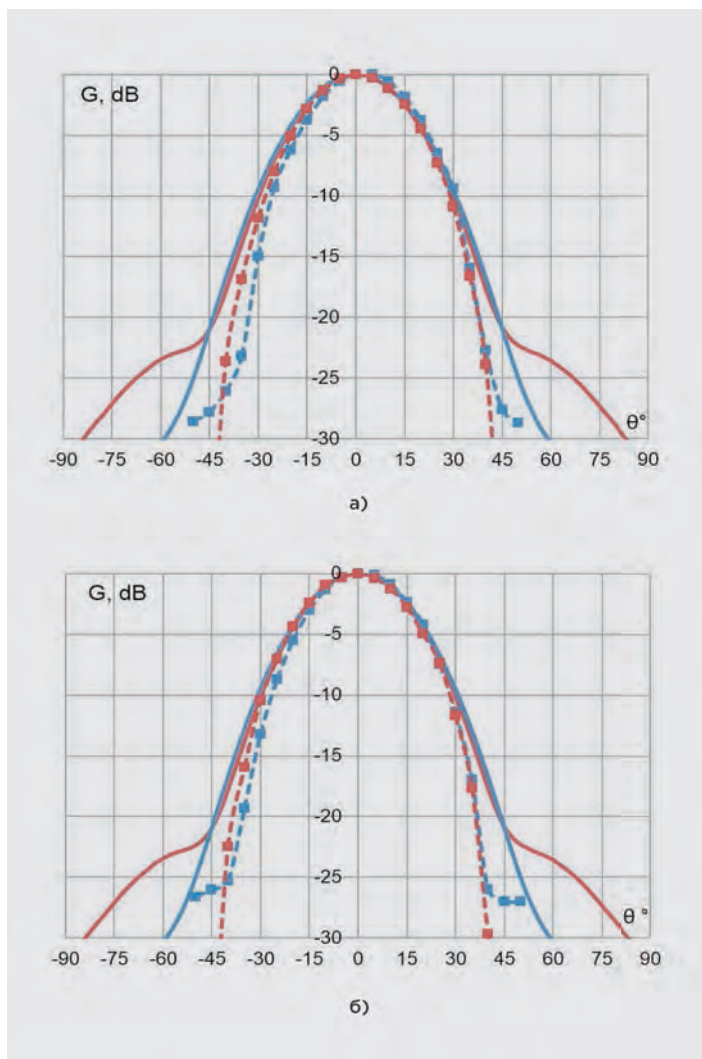
Рупорный облучатель зеркала радиотелескопа и плавный переход с круглого волновода (вход облучателя) на стандартный прямоугольный волновод X диапазона (рис 8) печатались по заказу Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН). Цель состояла в измерении электрических параметров рупорного облучателя и сравнении их с параметрами фрезерованного аналога. Центральная рабочая частота рупорного облучателя и перехода – 8,48 ГГц.

Объем деталей и поддержек, а также время печати в расчете на одну деталь приведены в Т11. После печати проводилась термообработка, снятие с платформы и дробеструйная обработка поверхности, снижающая ее шероховатость до Ra 5...7 мкм.

Расчет рупорного облучателя (рис 9), а также измерение электрических характеристик напечатанного из алюминиевого сплава AlSi10Mg облучателя и фрезерованного из латуни аналога выполнены в ИРЭ РАН. Для обоих рупоров использовался напечатанный переход. Видно, что измеренные значения показывают более узкую диаграмму направленности по сравнению с расчетной (рис 10). Это обусловлено, в основном, погрешностью измерений в безэховой камере. Частично ее можно снизить более точной установкой передающего и приемного рупоров так, чтобы их оси лучше совпадали. Измеренные диаграммы излучения фрезерованного и напечатанного облучателей по форме и ширине луча практически не различаются.



9 Модель рупорного облучателя с переходом



10 Нормированные диаграммы излучения (усиления) для напечатанного из AlSi10Mg (а) и фрезерованного из латуни (б) рупорных облучателей от угла места в двух главных плоскостях. Сплошные линии – расчет по HFSS модели, штриховые с точками – эксперимент: красный цвет – плоскость ZOx (H-плоскость), синий цвет – плоскость ZOy (E-плоскость). Угол места θ отсчитывается от оси Z

Т 1

Объем рупора и перехода, поддержек к ним, время печати

ПАРАМЕТР	РУПОРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ	ПЕРЕХОД
Объем без поддержек, куб. см	99	33,8
Объем поддержек, куб. см	20,1	9,2
Длительность печати в расчете на одну деталь:		
Мин. загрузка (1 деталь на платформе)	18 ч 12 мин.	14 ч 20 мин.
Макс. загрузка (6 деталей на платформе)	14 ч 20 мин.	7 ч 29 мин.

Значения коэффициентов отражения напечатанного и фрезерованного рупорных облучателей на рабочей частоте также близки друг к другу, а трудно устранимые осцилляции в измеренных частотных зависимостях отражения связаны, скорее всего, с недостаточно хорошим качеством использованных разъемов (рис 11).

Гофрированный рупорный облучатель Ka-диапазона

Имея положительные результаты тестирования рупорного облучателя на 8,48 ГГц, мы сделали следующий шаг в этом направлении – изготовление с последующим испытанием более сложного гофрированного рупорного облучателя на более высокие частоты Ka-диапазона (рис 12). Облучатель предназначен для применения в двухзеркальной антенне Кассегрена в системах связи. Рабочий диапазон частот облучателя: приемный Rx 17,5 – 21,2 ГГц, передающий Tx 26,5 – 31 ГГц.

Расчетные характеристики рупорного облучателя представлены в Т 2 и на рис 13. В настоящее время проводится подготовка к тестированию в ИРЭ РАН.

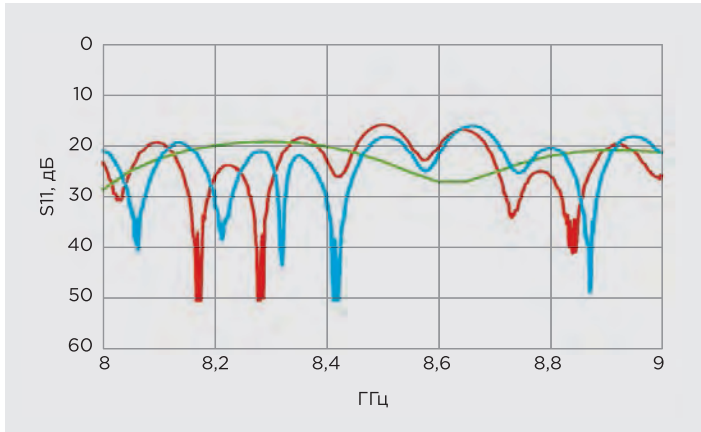
Заключение

Несмотря на высокую шероховатость каналов, рассмотренные примеры демонстрируют, что 3D-печать из AlSi10Mg методом селективного лазерного сплавления обеспечивает соответствие требованиям к электрическим характеристикам для некоторого множества СВЧ-волноводов и излучателей. Для расширения области применения 3D-печати для изготовления элементов волноводных трактов необходима отработка технологии постобработки: гидроабразивной прокатки, химического полирования, нанесения покрытий. Кроме того, необходимы испытания образцов и волноводов для определения стойкости к внешним воздействующим факторам. □

Т 2

Расчет согласования облучателя (рупор + переход) в рабочем диапазоне частот

F, ГГц	S11, дБ	KCB
Rx: сечение волновода 11 × 5,5 мм		
17,5	-11,4	1,74
19,35	-13,9	1,50
21,2	-20,2	1,22
Tx: сечение волновода 7,2 × 3,4 мм		
27,5	-27	1,09
29,25	-31,7	1,05
31	-26,8	1,10



1 1

Частотные зависимости коэффициента отражения рупорного облучателя: красная кривая – измеренная для напечатанного рупора, синяя – измеренная для рупора из латуни, зеленая кривая – расчет по модели

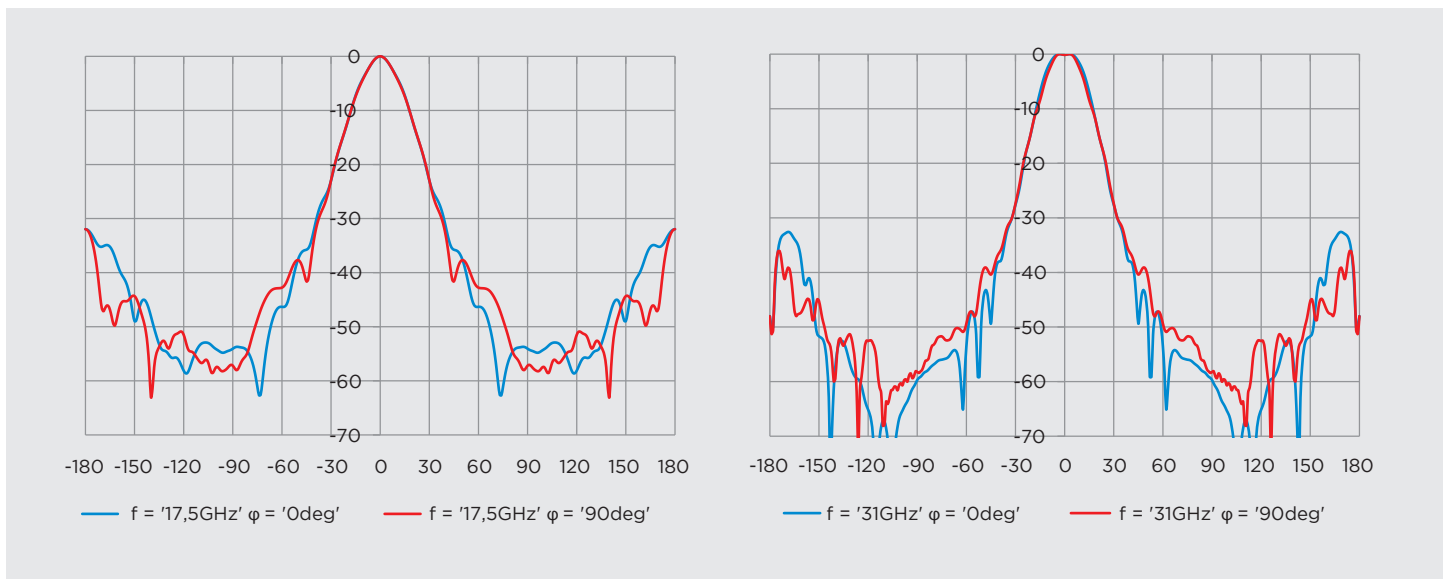
Рассмотренные в данной статье и другие напечатанные волноводы вы сможете увидеть 15-17 апреля на нашем стенде на выставке ЭлектронТехЭкспо в МВЦ «Крокус Экспо» или в нашем Центре развития технологий, заявки на посещение которого направляйте на электронную почту 3d@ostec-group.ru.

На этот адрес вы также можете отправлять запросы на печать волноводов.



1 2

Рупорный облучатель Ka-диапазона (а) и плавные переходы с круглого сечения входного волновода на стандартные прямоугольные волноводы (б, в). Габаритные размеры рупорного облучателя $\varnothing 130 \times 136$ мм



1 3

Примеры нормированных диаграмм излучения (усиления) на двух частотах в двух главных плоскостях. Синий цвет – Е-плоскость, красный цвет – Н-плоскость. Абсолютные значения усиления на оси облучателя примерно 20 дБ

Системы предупреждения дефектов: Viscom Quality Uplink

Даже при условии, что на предприятии налажен входной контроль, и существует устоявшаяся цепочка поставок комплектующих, от технологических дефектов из-за большого разброса причин их возникновения не застрахован никто. Для обеспечения качества изделий важно не только не пропускать дефекты, но и выявлять их на наиболее ранней стадии, иметь возможность прогнозировать их возникновение, чтобы оперативно предпринимать корректирующие меры. Этот вопрос решается уже не с помощью какого-либо конкретного оборудования, а с помощью системы, которая охватывает различные стадии технологического процесса и способна осуществлять сбор данных с оборудования и проводить их аналитическую обработку.

Один из способов выявить возможное появление дефекта – это контроль качества нанесения паяльной пасты. В составе автоматизированной линии это может быть реализовано двумя способами: инспекция качества нанесения с помощью автомата трафаретной печати либо с помощью отдельной автоматической системы контроля качества нанесения пасты, например, Viscom S3088 SPI. Отдельная специализированная система может выявить гораздо больше потенциальных дефектов по результатам инспекции отпечатков, но и оптический контроль, встроенный в принтер, это уже значительно лучше, чем «ничего».

Есть интересная статистика по снижению уровня дефектов при последовательном оснащении сборочной линии различными методами контроля на одном из немецких предприятий, производящих автомобильную электронику (ТЗ). Она показывает, что в отдельных случаях при

ТЗ

Статистика снижения уровня дефектов

ДЕФЕКТ	ПРОЦЕНТ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ЗА ОТЧЕТНЫЙ ПЕРИОД ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ (ЗА 100% ВЗЯТО ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ДЕФЕКТОВ ДО ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ)			ПРИМЕЧАНИЕ
	ВНЕДРЕНИЕ 3D-КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НАНЕСЕНИЯ ПАСТЫ	ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ АОИ ПОСЛЕ ПАЙКИ	ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ИНСПЕКЦИИ	
Непропай	40 %	40 %	20 %	Применение рентгена для поиска данного типа дефектов целесообразно при контроле скрытых под корпусом выводов
Холодная пайка, отсутствие «мениска» и т. п.	40 %	60 %	0 %	
Внутренние повреждения компонента	0 %	0 %	100 %	
Внутренние дефекты паяного соединения	0 %	0 %	100 %	
Отсутствие компонента	0 %	100 %	0 %	
Смещение компонента	30 %	70 %	0 %	
Установлен не тот типонаминал	0 %	90 %	0 %	Система АОИ не сможет определить ошибочный типонаминал при отсутствии на нем маркировки
Короткое замыкание	40 %	40 %	20 %	Применение рентгена для поиска данного типа дефектов целесообразно при контроле скрытых под корпусом выводов
Шарики припоя	50 %	40 %	10 %	Применение рентгена для поиска данного типа дефектов целесообразно при контроле скрытых под корпусом выводов
«Надгробный камень»	5 %	95 %	0 %	