Изготовление многослойных структур из SU8 для терагерцевого волновода со сверхнизкими потерями

В статье[1] представлены результаты микросборки первого в своем роде полого волновода на основе многослойной конструкции из фотополимера SU8. В соответствии с эксплуатационными испытаниями волновод обладает сверхнизкими потерями передачи (0,028–0,03 дБ/мм), что сопоставимо с показателями, наблюдаемыми в волноводах, полученных прецизионным фрезерованием на станках с ЧПУ.

Йингтао Тьян (Yingtao Tian)
Ксаобанг Шан (Xiaobang Shang)
Микаэль Ланкастер (Michael J. Lancaster)

Перевод:
Вячеслав Хриченко
Юлия Боброва

Волновод имеет два вывода, работающих в диапазоне WR-3 частот 220–325 ГГц. Ввиду устранения воздушных зазоров между слоями технология создания многослойных структур из SU8 имеет большие перспективы в снижении вносимых потерь в передачу излучения по волноводу. Кроме того, на достижение высоких эксплуатационных показателей повлияли такие факторы, как высокая равномерность толщины слоев SU8 и низкая шероховатость поверхности напыленного серебряного покрытия, что привело лишь к незначительному ослаблению СВЧ-сигнала.

Работа была выполнена при поддержке Исследовательского совета инженерных и физических наук Великобритании (EPSRC).

Введение

Оборудование, действующее в диапазоне частот от 100 Гц до 10 ТГц, обретает все новые перспективы применения. На данный момент без него нельзя представить такие области науки и техники, как медицинская визуализация, сверхбыстрое беспроводное соединение, системы безопасности [1] и прочее. Для того чтобы при столь высоких частотах достичь минимальных потерь и затухания сигнала на всей линии передачи, ее ключевые элементы должны обладать высокой точностью размеров и низкой шероховатостью поверхности. Потери при передаче определяются затуханием сигнала, проходящего через устройство. Таким образом, уменьшение вносимых потерь способствует увеличению производительности устройства.

Необходимым элементом СВЧ- и КВЧ-систем является волновод, который обычно представляет собой полый, заполненный воздухом канал, передающий электромагнитные волны. Традиционно волноводы изготавливаются с помощью прецизионного фрезерования на станках с ЧПУ [2]. Однако увеличение рабочей частоты электронных компонентов требует уменьшения размеров волноводов (поперечное сечение волновода для излучения в терагецевом диапазоне составляет 864×432 мкм), из-за чего все сложнее, а иногда и невозможно использовать станки для производства волноводов, обладающих сложной формой сечения. Поэтому с целью удовлетворения растущего спроса на волноводы для передачи терагерцевого излучения, требующие чрезвычайно высокой размерной точности и низкой шероховатости поверхности, была начата разработка новых технологических маршрутов.

Особую роль в развитии КВЧ-устройств играет частота 300 ГГц: в настоящее время промышленность, не имея развитых технологий создания волноводов для передачи излучения такой частоты, сосредоточена на создании аппаратуры, действующей на более низких частотах (<100 ГГц). Таким образом, успешное изготовление волновода для передачи излучения около 300 ГГц приведет к росту производства других устройств, функционирующих на более высоких частотах.

В качестве конструкционного материала для исполнения волновода может быть использован толстослойный фотополимер[2] SU8, обладающий хорошими диэлектрическими свойствами. Экономическая целесообразность его применения также обусловлена высокой воспроизводимостью результатов и меньшими инвестициями в сравнении с разработкой высокоточных фрезерных станков с ЧПУ. Фотолитография SU8 была успешно использована в предыдущих исследованиях при изготовлении низкочастотных волноводов, фильтров и щелевых антенн [3–6]. Однако с ростом частоты уменьшается величина технологических допусков и необходимо прикладывать больше

[1] Оригинал статьи опубликован в журнале J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS (Micro/Nanolithographi, MEMS, and MOEMS. 2014. Vol. 13 (1). США).
[2] Фоторезист — временное защитное покрытие, фотополимер — конструкционный материал. SU8 может применяться и в качестве фоторезиста, и в качестве конструкционного материала (*прим. перев.*).

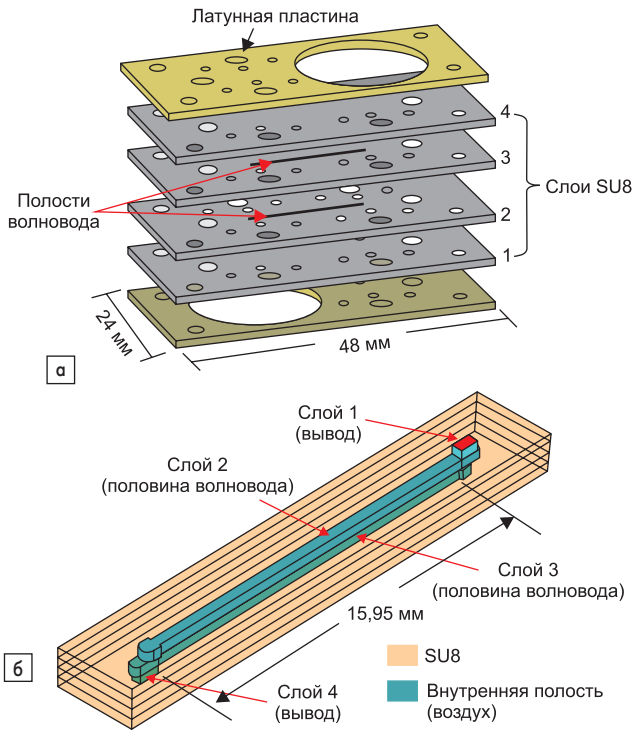

Рис. 1. Структура волновода типа WR-3 с двумя прямоугольными выводами:
а) послойная структура устройства;
б) структура волновода, где воздух обозначен зеленым цветом

усилий для удовлетворения высоких требований к точности размеров элементов, шероховатости их поверхности и минимизации потерь при передаче излучения.

Как правило, прямоугольный волновод типа WR-3 (220–325 ГГц) состоит из четырех равных слоев (рис. 1а), при этом каждый слой имеет номинальную толщину 432 мкм. Для того чтобы минимизировать потери, поперечное сечение такого волновода (432×864 мкм) было разделено пополам вдоль длинной грани. Для снятия показаний описанного прямоугольного 300-ГГц волновода были спроектированы два прямоугольных вывода, выступающих в роли портов входа/выхода, подключаемых к системе измерений сетевого анализатора (рис. 1б). Следует отметить, что требуется точное совмещение портов анализатора с выводами WR-3 волновода как на верхней, так и на нижней поверхности конструкции устройства. С помощью выравнивания по штифтам, устанавливаемым в отверстия в слоях SU8, была достигнута наибольшая точность совмещения, сравнимая с точностью фотолитографических процессов.

Длина всего волновода (за исключением выводов) составляет 15,95 мм. В ранних разработках все четыре слоя изготавливались из SU8 раздельно, затем слои покрывались серебром, соединялись с помощью адгезива и, наконец, собирались с помощью поддерживающих медных пластин. На рис. 2 видно, что такое исполнение приводило к возникновению между четырьмя слоями трех стыков, в которых могли образоваться воздушные зазоры. Было установлено, что наличие воздушных зазоров между слоями волновода оказывает пагубное влияние на производительность устройства из-за утечки тока и повышения потерь при передаче.

С целью уменьшения вносимых потерь была разработана технология производства волноводов, основанная на двухслойной конструкции из SU8. Вместо раздельного изготовления четыре слоя объединены в два двойных слоя, каждый из которых изготовляется в ходе одного технологического процесса. Затем стыки как между слоями 1 и 2, так и между слоями 3 и 4 устраняются за счет фотополимерного сшивания SU8. Таким образом возможность возникновения воздушных зазоров была значительно снижена, поскольку в структуре остался лишь один стык между слоями 2 и 3. Описанный процесс успешно применен в создании прямоугольного волновода, что значительно уменьшило величину вносимых потерь.

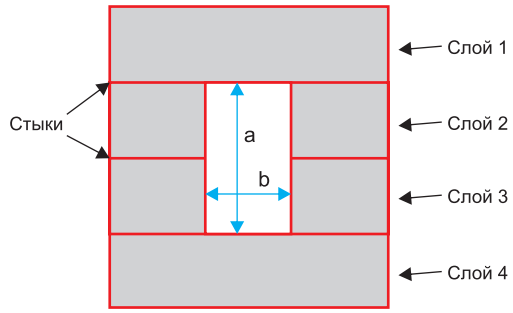

Рис. 2. Волновод типа WR-3, состоящий из четырех слоев, в разрезе. Толщина каждого слоя 432 мкм. A = 864 мкм, b = 432 мкм. Красные линии отображают металлизированные поверхности

В этой статье описан первый в своем роде волновод типа WR-3 (220–325 ГГц) со сдвоенными прямоугольными выводами, который обладает сверхнизкими потерями передачи излучения, сравнимыми с потерями в металлических волноводах, изготовленных на станках с ЧПУ. Далее будет подробно рассмотрен процесс изготовления волновода на основе фотополимера SU8, а также представлены и проанализированы его характеристики.

Изготовление волновода

Процесс формирования слоев волновода на основе SU8 продемонстрирован на рис. 3. Первый слой фотополимера SU8 серии 50 был нанесен на кремниевую подложку диаметром 100 мм. Толщина наносимого слоя фотополимера контролировалась его взвешиванием. Предварительно было установлено, что для достижения необходимой толщины в 432 мкм требуется 5,2 г SU8 серии 50. Использовался именно SU8 серии 50, поскольку эта серия имеет относительно низкую вяз-

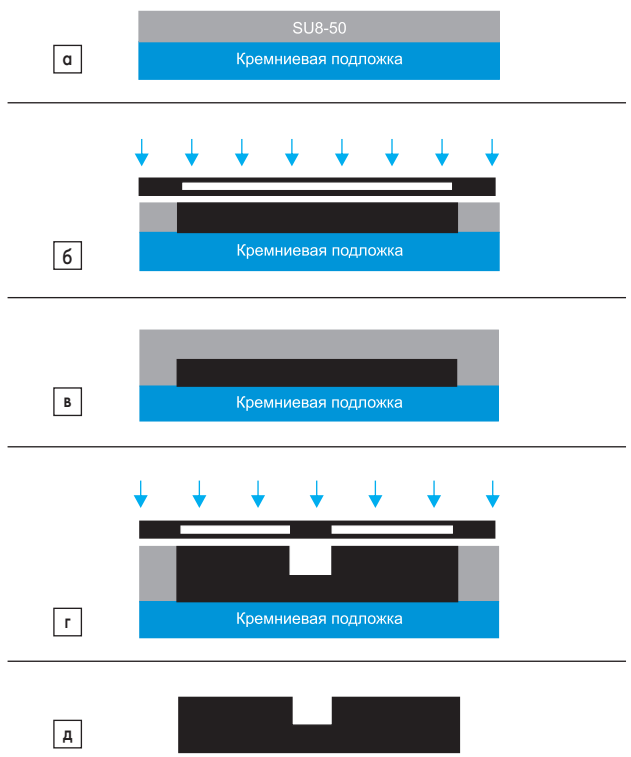

Рис. 3. Схематичное изображение технологического процесса изготовления половины волновода из двух слоев фотополимера SU8:
а) нанесение на подложку первого слоя SU8 центрифугированием;
б) экспонирование первого слоя без проявления, слабые межмолекулярные связи;
в) нанесение сверху второго слоя фотополимера;
г) экспонирование второго слоя, полимерное сшивание двух слоев;
д) снятие фотополимерной конструкции с подложки, серебрение

кость и лучше растекается по подложке, чем SU8 серии 100 или 250. Затем покрытые фотополимером подложки помещались на несколько часов на выровненную поверхность стола для самопланаризации нанесенного слоя под действием сил тяжести и поверхностного натяжения. После чего пластину сушили при +65 °С в течение 30 мин, а затем — при температуре +95 °С в течение 270 мин.

Для сведения к минимуму остаточных напряжений в SU8 после сушки необходимо охлаждать подложку при медленном режиме линейного изменения температуры (5 °С в 1 мин). Как только подложка остыла до температуры окружающей среды, высохший фотополимер был проэкспонирован на установке Canon PLA-510. Как правило, спектр излучения УФ-лампы состоит из трех основных линий с длинами волн 365, 405 и 436 нм. Известно, что длинноволновое УФ-излучение проникает глубже в толщу фотополимера, однако оно менее эффективно воздействует на фотокислоты, участвующие в полимеризации.

Сначала пластина засвечивалась в четыре захода по 40 с через фильтр L39, который пропускает только излучение с длиной волны выше 400 нм. После каждого захода проводился двухминутный перерыв, во время которого фотополимер стабилизировался.

После первой очереди экспонирования подложка засвечивалась еще четырежды — по 40 с с интервалами в 2 мин. На этот раз был использован фильтр PL360, пропускающий только I-линии длиной 365 нм. Затем для сшивки фотополимера была проведена постэкспозиционная сушка (далее — ПЭС) при +70 °С в течение 15 мин. Следует отметить, что фотополимер на данном этапе не проявлялся.

Второй слой SU8 серии 50 (той же массы 5,2 г) наносился поверх первого слоя. Затем пластина сушилась в течение 8,5 ч при +70 °С. Такой режим, характеризующийся низкой температурой и высокой продолжительностью сушки, был выбран для снижения накопленного в толстых слоях SU8 напряжения, более полной полимеризации первого слоя и повышения его прочностных характеристик. После сушки второго слоя фотополимера пластина была трижды проэкспонированна через фотошаблон порциями по 40 с в соответствии с технологией, описанной выше. Ранее в ходе экспонирования первого слоя в нем были получены скрытые изображения, соответствующие будущим отверстиям под штифты, которые затем использовались для обеспечения точного позиционирования фотошаблона при экспонировании второго слоя фотополимера.

Следующим этапом стала ПЭС, проходившая при более высокой температуре (+95 °С) в течение 30 мин, в ходе которой была усилена связь между слоями фотополимера. После чего заготовка с двумя слоями проэкспонированного фотополимера проявлялась на протяжении 45 мин в диэтиловом эфире угольной кислоты с применением устройства магнитного перемешивания. Далее следовало задубливание фотополимера, проходившее при температуре +110 °С в течение 15 мин.

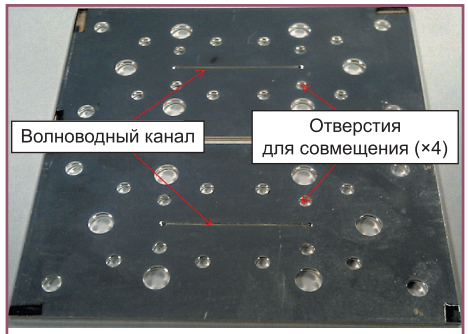

Рис. 4. Фотография заготовок двухслойного волновода типа WR-3 после нанесения серебра. Габариты каждой половины: 48×24×0,864 мм

Во время экспонирования второго слоя длинноволновое УФ-излучение проникало в оба слоя SU8, что обеспечило их необходимое прочное соединение. Для отделения SU8 от подложки образец был помещен в десятипроцентный раствор NaOH на несколько часов. Таким образом были получены две половины волновода, то есть структура из слоев 1 и 2 и структура из слоев 3 и 4.

При помощи установки термического испарения в вакууме Cressington 308R на каждую из двух полученных частей волновода было нанесено серебро. Предварительно образец очищался кислородной плазмой в течение 30 с, после чего наносился адгезионный подслой хрома толщиной 100 нм. Толщина слоя серебра составила 2 мкм, что обеспечивает хорошую электропроводимость и планируемую производительность изготавливаемого устройства.

Во время распыления образец вращался под углом в 30° к вертикальной плоскости и, таким образом, все поверхности боковых стенок были покрытии серебром. Результат металлизации представлен на рис. 4.

Для исследования воспроизводимости процесса было создано два образца. На рис. 5 показан укрупненный вывод волновода, полученного из двух слоев фотополимера SU8. Наблюдается небольшой наклон стенки, вызванный затенением во время экспонирования УФ-излучением. В ходе оптимизации технологического процесса была достигнута

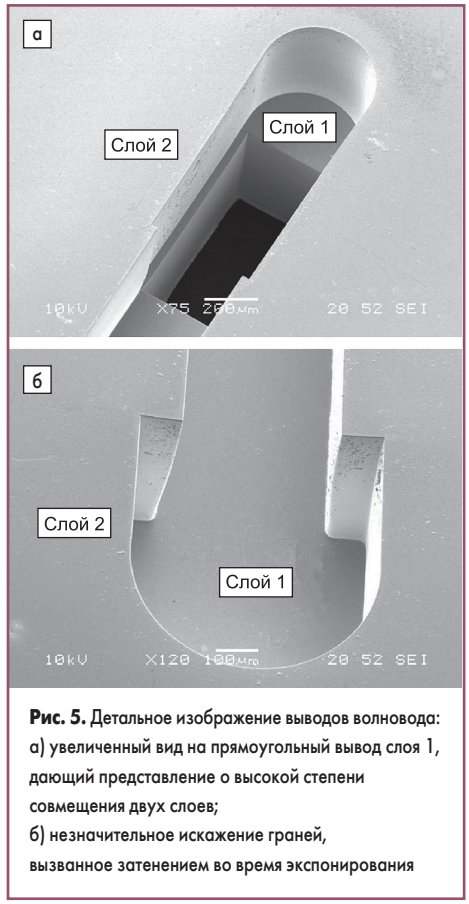

Рис. 5. Детальное изображение выводов волновода: а) увеличенный вид на прямоугольный вывод слоя 1, дающий представление о высокой степени совмещения двух слоев; б) незначительное искажение граней, вызванное затенением во время экспонирования

толщина слоя фотополимера, равная 432 мкм, с отклонением в 5 мкм.

После нанесения слоя серебра устройство готово к сборке. Для обеспечения жесткости конструкции, простоты сборки и присоединения к измерительному устройству были изготовлены две латунные пластины с отверстиями. Покрытые серебром слои SU8 были сложены в порядке, описанном на рис. 1а, и зажаты между латунными пластинами. Точность совмещения обеспечивалась четырьмя штифтами диаметром 1,6 мм. На рис. 6 показан собранный узел и устройство фланца, совместимого с разъемом UG-387. Латунные пластины обеспечивали только механическую поддержку и не играли роли в повышении точности совмещения верхней и нижней частей волновода.

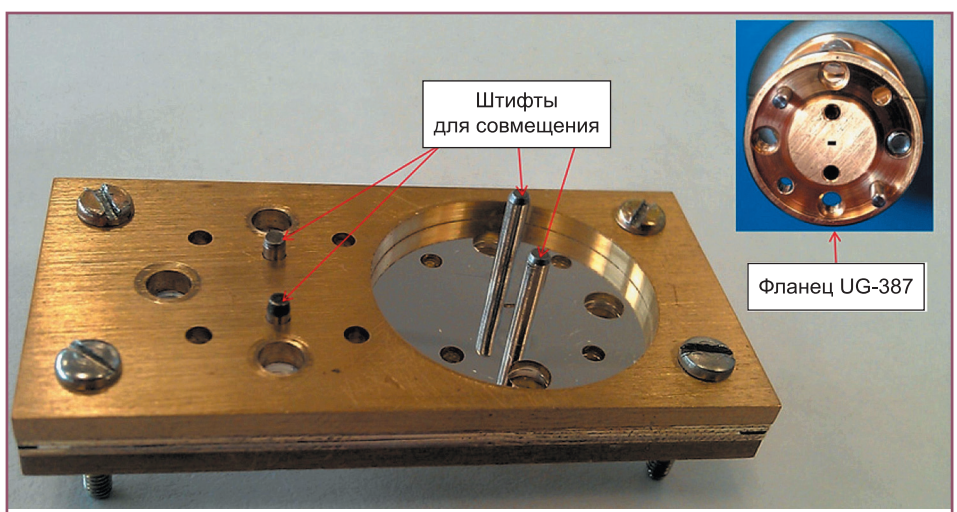

Рис. 6. Сборка волновода типа WR-3 и соединение его с выходом для измерений

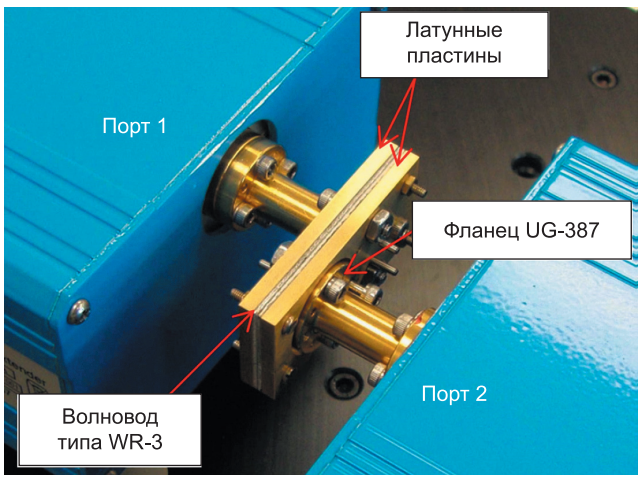

Рис. 7. Схема измерения характеристик двухслойного волновода типа WR-3 на основе SU8

Измерения и анализ результатов

Измерения проводились на анализаторе электрических цепей Agilent E8361A, обладающем расширенным модулем приема-передачи OML WR-3 на входе 1 и принимающим выходом 2 (рис. 7). Перед измерениями была выполнена калибровка по одному порту и по ответному сигналу. Для обеспечения точности позиционирования между фланцем и волноводом были размещены четыре центровочных штифта. Неразъемность соединения фланца с волноводом обеспечивалась винтами.

Для описания волновых свойств и определения S-параметров схемы использовалась матрица рассеяния. Эти S-параметры, а именно S_{11} и S_{21}, применяются для отображения степени передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) сигнала в двухпортовых СВЧ-компонентах и выражаются в децибелах (дБ). Таким образом, для волновода с двумя портами, пронумерованными как порты 1 и 2, параметр S_{11} описывает коэффициент отражения (обратных потерь), то есть какая часть сигнала отражается обратно к порту 1, когда согласованная нагрузка достигается на порте 2. Параметр S_{21} отражает коэффициент передачи или вносимые потери, обусловленные устройством при передаче из порта 1 в порт 2.

При идеальной передаче СВЧ-сигнала (при отсутствии вносимых потерь) коэффициент передачи составляет 100%, то есть $S_{21} = 0$ дБ. В реальных системах желательно, чтобы значение S_{21} было как можно меньше. На рис. 8а показаны результаты измерений S-параметров в соответствии с расчетными данными, полученными при моделировании. Видно, что вносимые потери составляют всего 0,5 дБ при широком диапазоне частот от 220 до 300 ГГц. При увеличении масштаба (рис. 8б) видно, что при более высоком частотном режиме (260–300 ГГц) значения вносимых потерь опускаются ниже 0,45 дБ. Это говорит о потерях всего в 0,03 дБ/мм в данном диапазоне частот. Столь низкие показатели сопоставимы с результатами в 0,015–0,025 дБ/мм, достигнутыми в волноводах, изготовленных фрезерованием на высокоточных станках с ЧПУ и описанных в источниках [2] и [5]. Вносимые потери, показанные на рис. 8, соответствуют проводимости покрытия в $1{,}86\times10^7$ См/м, что составляет около 30% проводимости серебра ($6{,}3\times10^7$ См/м).

Обратные потери в размере 10 дБ также являются хорошим показателем для устройства. Более того, результаты подтвердили высокую воспроизводимость метода, поскольку показатели S_{12} для двух образцов частично дублируют друг друга. Было сделано предположение, что причиной расхождения значений S_{11} двух устройств стало рассовмещение между двумя половинами волновода. Используемые в работе штифты имеют допустимое отклонение 20 мкм [9]. Точность совмещения первого образца оказалась несколько ниже. Это и привело к худшему показателю обратных потерь (S_{11}) в первом образце, так как показатель S_{11} чувствителен к точности совмещения.

Равнотолщинность слоев SU8 также является критерием качества волновода. Нанесение покрытия центрифугированием сопровождается ростом толщины фотополимера от центра к краю подложки, таким

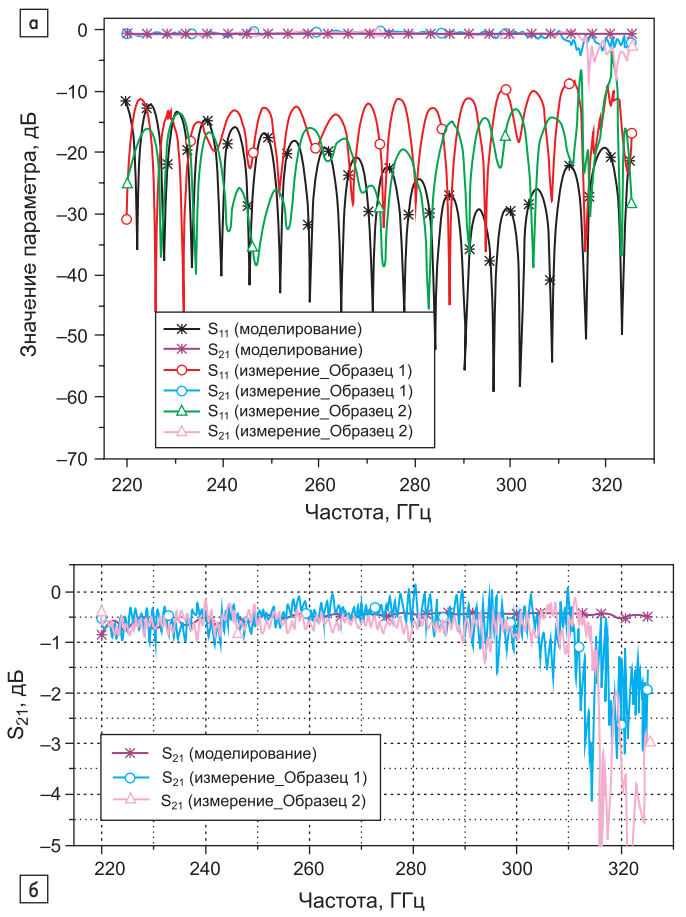

Рис. 8. а) Измеренные значения показателей S_{21} и S_{11} волновода в сравнении с результатами моделирования; б) увеличенный вид S_{21}. За эффективную проводимость в моделировании принято значение $1{,}86\times10^7$ см/м

образом, на кромках толщина покрытия может оказаться чрезмерно большой. Это было принято во внимание при изготовлении образцов — краевой валик был удален с каждой из подложек сразу же после центрифугирования. Затем каждая подложка была помещена на ровную поверхность на несколько часов, в течение которых, за счет сил поверхностного натяжения, происходила планаризация нанесенного слоя SU8. В представленном исследовании отклонение толщины слоя фотополимера на площади в 48×24 мм не превышало 5 мкм, что внесло немалый вклад в достижение высоких результатов.

Еще одним важным фактором, определяющим величину вносимых потерь, является шероховатость поверхности. Из-за рассеивания электронов на относительно шероховатой серебряной поверхности происходит повышение вносимых потерь и снижение проводимости. Согласно источникам [10] и [11] дополнительные потери, вызванные шероховатостью поверхности, определяются по формуле (1):

$$\alpha_c/\alpha_{c0} = 1+(2/\pi)\tan^{-1}[1{,}4\times(\Delta/\delta)^2], \quad (1)$$

где α_c — потери (в дБ) проводника со среднеквадратическим отклонением неровностей в Δ, α_{c0} — потери того же проводника с идеально гладкой поверхностью без каких-либо шероховатостей, δ — толщина скин-слоя проводника, а Δ/δ — нормированная шероховатость поверхности.

На рис. 9 представлены результаты исследования шероховатости поверхности серебряного покрытия, напыленного на двухслойный волновод SU8 WR-3. Исследование осуществлялось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Было получено значение среднеквадратического отклонения шероховатости ниже 40 нм. Подставив в уравнение значение $\Delta = 40$ нм, получим α_c в размере 0,017 дБ/мм. Согласно расчетам потери без учета шероховатости поверхности (α_{c0}) составили 0,016 дБ/мм. В этих расчетах использовались значения $6{,}3\times10^7$ См/м и 300 ГГц для проводимости серебра и рабочей частоты

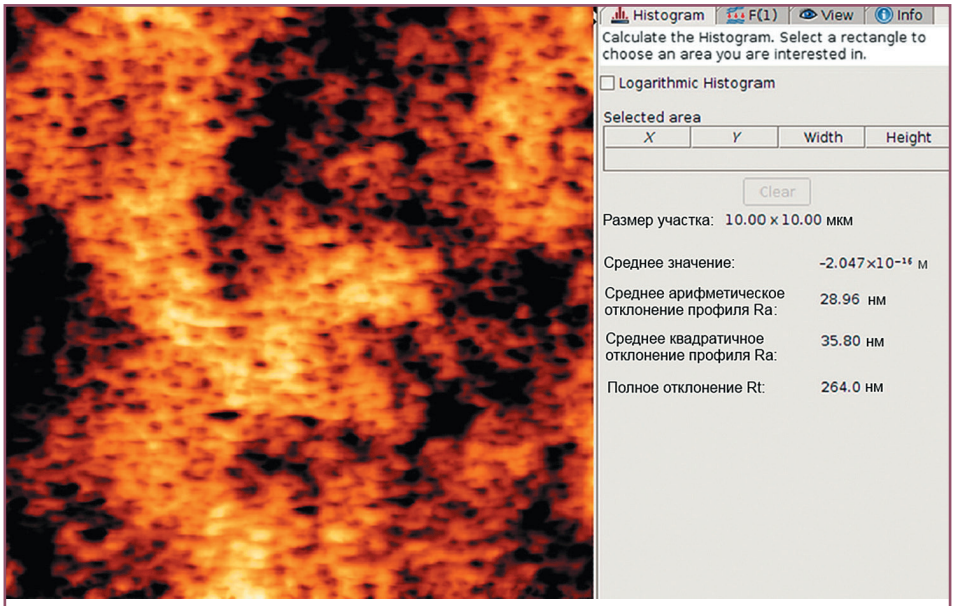

Рис. 9. Шероховатость поверхности серебряного покрытия, измеренная атомно-силовым микроскопом

соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что достигнутая шероховатость поверхности не оказывает существенного влияния на функциональные характеристики волноводов на основе фотополимера SU8.

Заключение

Впервые был успешно разработан и апробирован процесс изготовления многослойной конструкции из толстых слоев фотополимера SU8 для применения в качестве WR-3-волновода со сверхнизкими вносимыми потерями. Описанная технология устранения границ раздела между фотополимерными слоями значительно снижает вероятность возникновения воздушных зазоров между ними.

При функциональных испытаниях устройства с полимерным волноводом на частотах от 220 до 310 ГГц были зафиксированы вносимые потери в размере 0,028–0,03 дБ/мм, что сопоставимо с потерями в металлических волноводах, полученных при помощи прецизионных станков с ЧПУ.

Более того, процесс оказался высокопроизводительным и зарекомендовал себя как перспективный вариант изготовления сложных терагерцевых систем, особенно в случаях, где использование оборудования с ЧПУ затруднительно.

Литература

1. Hosako I. et al. At the dawn of a new era in terahertz technology. Proc. IEEE 95 (8), 1611–1623 (2007).
2. Kerr A. R. et al. Loss of gold plated waveguide at 210–280 GHz. ALMA Memo 585, 1–6 (2009).
3. Ke M. et al. Micromachined rectangular coaxial line and cavity resonator for 77 GHz applications using SU8 photoresist. 2008 Asia-Pacific Microwave Conf., IEEE. Macau, 2008.
4. Wang Y., Ke M., Lancaster M. J. Micromachined 38 GHz cavity resonator and filter with rectangular-coaxial feed-lines. IET Microwaves Antennas Propag. 3 (1), 125–129, 2009.
5. Murad N. A. et al. Micromachined H-plane horn antenna manufactured using thick SU-8 photoresist. Electron. Lett. 46 (11), 743–745, 2010.
6. Murad N. A. et al. Micromachined millimeter-wave Butler matrix with a patch antenna array. 2009 Mediterranean Microwave Symposium (MMS). IEEE. Tangiers, 2009.
7. Shang X. et al. Micromachined WR-3 waveguide filter with embedded bends. Electron. Lett. 47 (9), 545–547, 2011.
8. Shang X. et al. Measurements of micromachined submillimeter waveguidecircuits. 2010 76th ARFTG Microwave Measurement Conf. IEEE. Clearwater Beach, Florida, 2010.
9. Shang X. et al. WR-3 band waveguides and filters fabricated using SU8 photoresist micromachining technology. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2 (6), 629–637, 2012.
10. Mehdi I. et al. A broadband 900-GHz silicon micromachined two-anode frequency tripler. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 59 (6), 1673–1681, 2011.