

А. Е. КРЕНДЕЛЕВ

Россия, г. Зеленоград, НИИ "Научный центр"

Дата поступления в редакцию

05.03 2001 г.

Оппонент к. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН  
(НИИ "Орион", г. Киев)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ГИС КВЧ-ДИАПАЗОНА

*Обсуждаются технологические задачи в изготовлении ГИС СВЧ миллиметрового диапазона и перспективные пути их решения.*

В 1979 г. Всемирная конференция по радиочастотам утвердила план использования частот миллиметрового диапазона выше 40 ГГц. Этот план открывает путь для широкого развития техники крайне высоких частот (КВЧ) — 30–300 ГГц и гипервысоких частот (ГВЧ) — 300–3000 ГГц. Реализация этого плана должна обеспечить возможность проектирования компактных и эффективных по стоимости изготовления систем [1] с учетом совершенствования как технологии полупроводниковых ИС, так и методов тонкопленочной технологии.

Цель настоящего обзора — проанализировать задачи, возникающие в области технологии изготовления СВЧ ГИС миллиметрового диапазона, и обсудить возможные варианты их решения.

Будем рассматривать СВЧ ГИС различной функциональной направленности, т. е. широкий набор устройств на микрополосковых линиях (МПЛ) СВЧ, включая элементы с сосредоточенными параметрами, микрополосковые антенны.

При конструировании таких устройств для КВЧ необходимо при сохранении диэлектрической проницаемости подложки уменьшать геометрические размеры несимметричной МПЛ адекватно укорочению волны. Нетрудно показать, что при уменьшении ширины МПЛ и толщины подложки возрастают относительные погрешности соответствующих слагаемых погрешности волнового сопротивления ( $\delta Z$ ). Это вызывает необходимость расчета допусков.

К основным дестабилизирующим факторам, определяющим относительную погрешность волнового сопротивления  $\delta Z$ , относятся:

- разброс значений диэлектрической проницаемости ( $\delta\epsilon$ );
- разброс подложек по толщине ( $\delta h$ );
- разброс ширины проводника МПЛ ( $\delta W$ ).

Если принять, что  $\delta\epsilon$ ,  $\delta h$ ,  $\delta W$  имеют нормальный закон распределения (что в большинстве случаев имеет место), то  $\delta Z$  также распределена нормально. Тогда математическое ожидание  $M(\delta Z)$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma(\delta Z)$  могут быть определены по формулам

$$M(\delta Z) = m_1 M(\delta\epsilon) + m_2 M(\delta h) + m_3 M(\delta W); \quad (1)$$

$$\sigma(\delta Z) = \{(m_1 \sigma_{\delta\epsilon})^2 + (m_2 \sigma_{\delta h})^2 + (m_3 \sigma_{\delta W})^2\}^{1/2}, \quad (2)$$

где  $m_1, m_2, m_3$  — коэффициенты влияния  $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$ , соответственно;

$M(\delta\epsilon), M(\delta h), M(\delta W)$  — математические ожидания  $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$ ;

$\sigma_{\delta\epsilon}, \sigma_{\delta h}, \sigma_{\delta W}$  — среднеквадратические отклонения  $\delta\epsilon, \delta h, \delta W$ , соответственно.

Коэффициенты влияния определяются по формулам

$$m_1 = (\delta Z / \delta\epsilon) \epsilon / Z; \quad m_2 = (\delta Z / \delta h) h / Z; \quad m_3 = (\delta Z / \delta W) W / Z.$$

$$\delta Z = m_1 \delta\epsilon + m_2 \delta h + m_3 \delta W, \quad (3)$$

при этом  $m_2 = -m_3$ .

Поскольку допуск на волновое сопротивление определяет точность воспроизведения большинства функциональных параметров устройств на МПЛ, то при реализации рассматриваемых устройств миллиметрового диапазона следует обеспечить более жесткие допуски на величины  $\epsilon, h, W$ .

Известно, что допуски на геометрические размеры линий передач элементов тракта антенных устройств ужесточаются на порядок при переходе от сантиметрового диапазона к миллиметровому [2]. В общем случае допуск на параметр  $Z$  определяется (при заданной допустимой величине выхода годных) как систематической, так и случайной составляющей погрешности. Поскольку систематическая составляющая может быть либо учтена при проектировании изделий, либо устранена совершенствованием технологического процесса (известно, что при хорошо отлаженном технологическом процессе систематическая составляющая погрешности формируемого параметра близка к нулю), то особое значение имеет случайная составляющая погрешности каждого из рассматриваемых параметров.

Более точный анализ предполагает учет влияния изменения ширины проводника МПЛ не только от линии к линии (регулярные отклонения). В силу того, что плотность тока в проводнике МПЛ распространяется неравномерно по его сечению и имеет большее значение на краях, дефекты границы проводника приводят к перераспределению плотности тока, а следовательно, к увеличению потерь, которое можно оценить коэффициентом  $K_d$ , показывающим, во сколько раз увеличиваются потери на внешней и

внутренней поверхности полоскового проводника за счет нерегулярности краев. Исходя из того, что при деформации проводника плотность тока в его середине остается постоянной, можно получить [3]:

$$K_d = 1 + 7,2\Delta_n/W, \quad (4)$$

где  $\Delta_n$  — глубина дефектов границы проводника.

Нерегулярные отклонения, кроме увеличения потерь в МПЛ, ухудшают точностные характеристики, а именно, увеличивают дисперсию и асимметрию распределения  $Z$  МПЛ, расположенных на одной подложке [4].

По аналогичным причинам для устройств миллиметрового диапазона повышаются требования к четкости и однородности границы раздела «диэлектрическая подложка — проводник МПЛ».

Таким образом, задачи создания рассматриваемых устройств миллиметрового диапазона сводятся к задачам выбора:

- материала подложки и технологии ее изготовления;
- методов и технических средств формирования геометрических размеров проводника;
- методов и режимов осаждения, обеспечивающих исключение неоднородностей (дефектов) как по краевым границам МПЛ, так и на границе «подложка — проводник».

Во многом успех в создании устройств миллиметрового диапазона определяет подложка МПЛ ГИС СВЧ. Диэлектрическая подложка исполняет роль несущего и канализирующего энергию компонента. Поэтому ее физико-технические характеристики оказывают влияние практически на все функциональные параметры устройства. Напри-

мер, импеданс и затухание в микрополосковых линиях, добротность резонаторов и воспроизводимость их параметров прямо связаны с такими характеристиками подложек как диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , однородностью указанных характеристик на поверхности и в объеме, а также качеством обработки поверхности подложки.

К диэлектрическим подложкам СВЧ ГИС миллиметрового диапазона предъявляются следующие требования:

- минимальные диэлектрические потери ( $\text{tg}\delta < 10^{-4}$ );
- высокая однородность структуры и состава (воспроизводимость величины  $\epsilon$  на поверхности и в объеме подложки и в партии подложек);
- высокое качество обработки поверхности (не хуже 14 класса);
- высокая точность воспроизведения толщины (неравномерность в пределах одной подложки, разброс средних значений параметра в партии подложек);
- высокая механическая прочность;
- химическая стойкость к различным активным средам;
- возможность изготовления подложек различных размеров, включая крупноформатные;
- материал подложки должен способствовать (при соответствующей обработке) прочному сцеплению пленок металлов, характеризующихся высокой проводимостью (Cu, Al), с ее поверхностью.

Указанным требованиям в определенной мере удовлетворяют подложки из ряда неорганических и органических материалов. Характеристики подложек,

Таблица 1

Характеристики подложек из неорганических диэлектриков

| Материал                            | Марка          | Преимущества  | Недостатки                               | Характеристики              |                                    |   |                                   |                         |
|-------------------------------------|----------------|---|--|-----------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------|
|                                     |                |   |  | $\epsilon$<br>( $f=10$ ГГц) | $\text{tg}\delta$<br>( $f=10$ ГГц) | $\lambda$ ,<br>$\left(\frac{\text{ккал}}{\text{см}\cdot\text{с}\cdot\text{C}}\right)$ | Прочность,<br>кгс/мм <sup>2</sup> | Пористость,<br>% объема |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99,5 | Поликор А-995  | Высокие диэлектрические, механические, тепловые свойства                      | Неоднородность, анизотропия              | 9,6                         | $1\cdot 10^{-4}$                   | 0,07  | 30                                | 3,0                     |
|                                     | Поликор А-995К | То же + однородность свойств  | Точность в достижимой толщине            | 9,75                        | $1\cdot 10^{-4}$                   | 0,07  | 32                                | 1,0                     |
| Лейко-сапфир (20...100)             | —              | Монолитная беспористая структура  | Сильная анизотропия $\epsilon$ и ТКЛР    | 9...12                      | $<1\cdot 10^{-4}$                  | 0,07  | 35                                | 0                       |
| Ситалл (0,5)                        | СТ-32          | Высокооднородная беспористая структура, однородность свойств                  | Низкая теплопроводность, неустойчивость  | 10,0                        | $3\cdot 10^{-4}$                   | 0,007   | 13                                | 0                       |
|                                     | СТ-36          |   |  | 5,6                         | $2\cdot 10^{-4}$                   | 0,008   | 15                                | 0                       |
| Кварцевое стекло (0,1...0,5)        | КВ             | Высокостабильное значение $\epsilon$ , высокооднородная беспористая структура | Низкие теплопроводность, ТКЛР            | 3,85                        | $1\cdot 10^{-4}$                   | 0,002   | 10                                | 0                       |
| Керамика BeO                        | ОБ-1           | Высокая теплопроводность  | Неоднородность, дефектность, токсичность | 6,6...7,0                   | $(2...3)\cdot 10^{-4}$             | 0,4...0,5   | 20                                | 5,5                     |

выполненных из наиболее перспективных *неорганических* диэлектриков, представлены в **табл. 1**.

Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют подложки из лейкосапфира. Поскольку имеются сведения о возможности на этапе конструирования учесть анизотропию свойств подложки, становится незначимым основным недостаток лейкосапфира (сильная анизотропия  $\epsilon$  и ТКЛР). Однако подложки из лейкосапфира пока дороги (в 20–100 раз дороже подложек из поликора). Требованиям по электрическим характеристикам удовлетворяют также подложки из окиси алюминия (А-995К), выгодно отличающиеся от других материалов высокой теплопроводностью и механической прочностью.

Основная проблема в изготовлении подложек из неорганических материалов — трудность достижения малых толщин, обеспечивающих их использование в диапазоне КВЧ. Существующая технология изготовления подложек из поликора позволяет получать подложки толщиной 250 мкм и выше. Для получения подложек меньшей толщины могут быть применены перспективные методы и процессы, позволяющие формировать диэлектрические слои на металлических подложках. Среди таких методов можно назвать:

- метод электрофореза (требуется последующая высокотемпературная обработка структуры «металлическая подложка — диэлектрический слой»);
- метод плазмоструйного нанесения.

Свойства *органических* материалов, используемых для подложек СВЧ ГИС, приведены в **табл. 2**. Указанные материалы обеспечивают сравнимость этих подложек с подложками из неорганических материалов по электрическим и механическим свойствам и более низкую стоимость. Кроме того, следует отметить возможность получения СВЧ ГИС больших размеров и получение малой (менее 200 мкм) толщины подложек при использовании пленок из фторпласта и полистирола.

Наиболее часто применяются материалы, представляющие собой смесь тефлона со стеклом с плетеной или микроволоконистой структурой, в частности, дюрюид марок 5880 и 5870 с диэлектрической проницаемостью 2,33 и 2,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $6 \cdot 10^{-4}$ , соответственно. К менее распространенным материалам относятся полистироловые смолы (как с наполнителем, так и без них), имеющие  $\epsilon=2,6$ .

Новый материал фирмы Rogers Corp дюрюид 6010 представляет собой смесь тефлона со стеклянным порошком. Он сопоставим по  $\epsilon \approx 10,5 \pm 0,25$  с окисью алюминия. Отмечается [5], что применение этого материала позволяет в два раза уменьшить габариты схемы по отношению к дюрюиду марки 5870. В отличие от керамики, он легко подвергается резке и сверлению. По оценке специалистов, схемы на подложках из этого материала должны быть в пять раз дешевле схем на подложках из окиси алюминия. Некоторые разработчики проектируют ВЧ-блок систем РПД, выполненных целиком на одной плате из материала типа 6010 [6], в то время как при использовании окиси алюминия для изготовления таких блоков требуется несколько плат с проволочными межсоединениями.

Таблица 2

Характеристики подложек из органических диэлектриков

| Материал подложки  | $\text{tg}\delta$  | $\epsilon$ | Диапазон рабочих температур, °С | Стоимость               |
|--|--------------------|------------|---------------------------------|-------------------------|
| Тефлон без наполнителя   | $4 \cdot 10^{-4}$  | 2,10       | -27...+260                      | Высокая                 |
| Тефлон со стеклянным наполнителем плетеной структуры                             | $9 \cdot 10^{-4}$  | 2,17       | -27...+260                      | Средняя                 |
|  | $15 \cdot 10^{-4}$ | 2,33       |                                 |                         |
|  | $18 \cdot 10^{-4}$ | 2,45       |                                 |                         |
|  | $22 \cdot 10^{-4}$ | 2,55       |                                 |                         |
| Тефлон со стеклянным наполнителем с неупорядоченной микроволоконистой структурой | $9 \cdot 10^{-4}$  | 2,17       | -27...+260                      | Между средней и высокой |
|  | $15 \cdot 10^{-4}$ | 2,35       |                                 |                         |
| Тефлон с кварцевым наполнителем  | $6 \cdot 10^{-4}$  | 2,47       | -27...+260                      | Высокая                 |
| Полистирол сетчатой структуры с кварцевым наполнителем                           | $5 \cdot 10^{-4}$  | 2,65       | -27...+260                      | Между средней и высокой |
| Полистирол сетчатой структуры с наполнителем из керамического порошка            | $5 \cdot 10^{-4}$  | 3...15     | -27...+110                      | То же                   |
|  | $15 \cdot 10^{-4}$ |            |                                 |                         |
| Полистирол сетчатой структуры со стеклянным наполнителем                         | $1 \cdot 10^{-3}$  | 2,62       | -27...+110                      | Низкая                  |
| Кремнийорганическая смола с наполнителем из керамического порошка                | $5 \cdot 10^{-4}$  | 3,25       | -                               | Высокая                 |
|  | $4 \cdot 10^{-3}$  |            |                                 |                         |

К новым пластмассовым материалам относится слоистый пластик марки Micaply 5032 (фирма Mica Corp) с  $\epsilon=4,8$  и  $\text{tg}\delta=0,01$ , композиционный материал марки Epsilon-10 (фирма 3M Corp) с  $\epsilon=10$  и  $\text{tg}\delta=0,002$ , материал серии 800 (фирма Keene Corp). Этот класс материалов используется для изготовления ГИС КВЧ на микрополосковых линиях и служит для замены окиси алюминия.

Армирование тефлона с помощью случайно диспергированных стеклянных микроволокон вместо плетеной стекловолоконистой структуры позволяет снизить ВЧ-потери. Подложки на основе такого тефлона характеризуются высокой однородностью  $\epsilon$  в широком диапазоне частот. Такие подложки подвергаются травлению при температуре до 52°С, отверстия металлизуются гальваническим способом при температуре до 60°С. Обеспечивается высокая точность получения резко очерченных линий с незначительным подтравливанием. При необходимости материал может обрабатываться при более высоких температурах. Кроме того, в таких подложках легко пробиваются отверстия, они хорошо режутся; гальваническое покрытие в них надежнее, чем у тефлоновых пластин, армированных плетеным стекловолокном.

Случайное диспергирование стеклянных волокон в тефлоновой матрице позволяет получать очень низкий коэффициент анизотропии, определяющий соотношение диэлектрических постоянных, измеренных в горизонтальной и вертикальной плоскости подложки (что особенно

Таблица 3

Характеристики полимерных пленок

| Материал   | $\epsilon$<br>( $f=10$ ГГц) | $\text{tg}\delta$<br>( $f=10$ ГГц) | $K_T$ ,<br>Вт/(м·°С) | ТКЛР·10 <sup>5</sup> | Примечания                                 |
|------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| Фторопласт | 2                           | $3 \cdot 10^{-4}$                  | 0,23                 | 8...23               | —  |
| Стирол     | 3...16                      | 9...30                             | 0,2...0,5            | 3...10               | Малая химическая устойчивость              |
| Полиэтилен | 2,5                         | 5                                  | 0,22                 | 2,4                  | Низкая теплостойкость                      |
| Арилокс    | 2,5                         | 6                                  | 0,21                 | 5,2                  | Низкая стойкость к ароматическим углеводам |

СВЧ ГИС, изготовленных на подложках с  $\epsilon=35...90$ , не уступающих достигнутому в настоящее время для ГИС на подложках с  $\epsilon=10$ . Полученное уменьшение размеров схемы обеспечило 2–5-кратное снижение стоимости платы СВЧ ГИС, а также улучшение массогабаритных характеристик.

Остается заманчивым использование в качестве подложки для СВЧ ГИС арсенида галлия. В этом случае возможно в перспективе

важно при изготовлении резонаторов с узкими щелями связи). Для плат из нового материала типов 5880 и 5870 коэффициент анизотропии изменяется в интервале 1,02...1,04 (а у тефлоновых пластин, армированных плетеным стекловолокном, – 1,09...1,19).

Опытные образцы подложек из материалов, приведенных в табл. 2, имеют самый низкий для диэлектрических подложек допуск на  $\epsilon$  ( $\pm 0,01$ ). Для плат с номинальной толщиной  $\approx 0,78$  мм и  $\approx 3,17$  мм могут быть получены допуски на толщину  $\pm 0,01$  и  $\pm 0,05$ , соответственно.

В настоящее время разрабатываются материалы с  $\epsilon=6$  для подложек с промежуточной величиной потерь. Созданы платы со сверхтонким слоем фольги (5–9 мкм) и с толстыми заземляющими пластинами. Получены подложки как с односторонним, так и с двухсторонним фольгированием, толщина которых изменяется в широком диапазоне.

Однако, по мнению специалистов, наиболее перспективным материалом является тефлон со стеклянными наполнителем плетеной структуры. Его основные преимущества: высокая стабильность размеров подложки, возможность жесткого контроля  $\epsilon$ , хорошее согласование по температурному коэффициенту расширения с медью, высокое сродство к меди, низкая хладнотекучесть, стойкость к химическому воздействию, простота механической обработки, способность работать в широком диапазоне температур, возможность изготовления крупноформатных подложек (91,44×91,44 см).

Согласно прогнозам, предпочтение в будущем по-прежнему будет отдаваться подложкам из материала на основе тефлона, а для мм-диапазона перспективным будет использование подложек из чистого тефлона с низкими потерями (см. табл. 2).

Вместе с тем в качестве перспективного рассматривается и направление полимерных материалов. Основные характеристики полимерных пленок, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, приведены в табл. 3.

Использование приведенных в таблице материалов в качестве подложек СВЧ ГИС может дать положительные результаты. Особое внимание заслуживают пленки из фторопласта, однако их применение в качестве подложек требует решения проблемы адгезии металлических слоев к этому материалу.

Известные исследования микрополосковых узлов показали возможность получения параметров

изготовления монолитного СВЧ-устройства, содержащего как активные компоненты, так и МПЛ. (Реальное значение толщины полупроводниковых пластин, применяемых в производстве, в настоящее время составляет  $\approx 200$  мкм. Поэтому частотный диапазон СВЧ ГИС на арсениде галлия может быть ограничен 100 ГГц.)

**В**ыбор материала подложки и способов ее изготовления могут обеспечить достижение малых значений толщины  $h$ , высокой идентичности  $h$  и  $\epsilon$  в пределах подложки и в партии подложек. В то же время комплексный подход к проблеме создания устройств миллиметрового диапазона диктует необходимость существенного повышения точности формирования размеров топологического рисунка, а также разрешающей способности методов формирования проводников в случае изготовления элементов с сосредоточенными параметрами.

Точность критичных размеров, например ширины МПЛ  $W$ , определяется процессами литографии и травления. Современные методы фотолитографии, применяемые при изготовлении полупроводниковых СБИС, позволяют уверенно формировать проводники шириной 1 мкм и выше с достаточной точностью (погрешность совмещения  $\pm 0,15$  мкм и фокусировки в пределах 0,5 мкм), однако при этом площадь топологического рисунка не превышает 10×10 мм. Использование проекционной печати позволяет (с помощью мультипликации) проецировать проводники МПЛ на площадь достаточно больших размеров (например, 100×100 мм). Следует ожидать, что при ширине МПЛ миллиметрового диапазона порядка 20–30 мкм точность формирования этой величины будет определяться процессами травления. Поэтому актуальна задача выбора метода и технологических средств осуществления этого процесса.

Основные недостатки широко применяемого в технологии СВЧ ГИС процесса жидкостного химического травления (ЖХТ) – изотропность и слабая управляемость – являются принципиально ограничивающими точность формирования МПЛ. Увеличение точности можно обеспечить применением управляемых процессов ионного травления [7].

Существует две разновидности ионного травления: ионно-плазменное (ИПТ) и ионно-лучевое (ИЛТ). При ИПТ подложка помещается в зону плазмы газового разряда, а при ИЛТ – в вакуумную зону, отдаленную от области плазмы. ИЛТ, по сравнению с ИПТ, обладает следующими преимуществами:

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- высоким показателем анизотропии;
- меньшим радиационным воздействием заряженных частиц и фотонов (из-за отдаления рабочей камеры от источника);
- меньшим загрязнением образцов инородными частицами;
- возможностью независимой регулировки угла падения пучка ионов (это позволяет управлять профилем травления).

Результаты сравнения ЖХТ с ИПТ и ИЛТ представлены в **табл. 4** [5,8].

Таблица 4

*Сравнительные характеристики методов травления*

| Параметр  | Вид травления |         |          |
|---|---------------|---------|----------|
|   | ЖХТ           | ИПТ     | ИЛТ      |
| Показатель анизотропии (отношение скоростей травления по перпендикуляру и по касательной к поверхности) | 0,5...1       | 5...10  | 10...100 |
| Скорость травления, нм/мин  | 15            | 0,1...1 | 0,3...3  |
| Обеспечиваемая разрешающая способность, лин/мм  | 250           | 2000    | 3000     |
| Среднеквадратическое отклонение подтравы по подложке при толщине слоя 1 мкм                             | 6,2           | 1,5     | 0,2      |

Преимущества метода ИЛТ заключаются в более высокой точности и разрешающей способности этого метода, а также в возможности автоматизации, экологической чистоте и экономичности.

Ионно-лучевое травление как метод формирования топологического рисунка ГИС СВЧ может быть реализован при помощи источников ионов (ИИ) типа Кауфмана или источников, выполненных на базе ускорителей ионов анодным слоем (УАС). Представителем первых является ИИ МАИ 208 2Т, представителем вторых — широко применяемый в промышленности источник “Радикал”.

Последний формирует трубчатый поток ионов, захватывающий небольшую площадь обработки. Применение этого источника для обработки подложек размерами 48×60 мм требует их перемещения в зоне травления. ИИ “Радикал” работает при напряжении разряда более 1 кВ. Это вызывает усиленное распыление стенок разрядной камеры и загрязнение ионного пучка. Ввиду отсутствия у этого источника ионно-оптической системы поток ионов имеет размытый энергетический спектр.

Ряд недостатков источника “Радикал” устранен в ИИ, выполненном на базе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (источники УЗДП [6]). Этот источник обладает мягким энергетическим спектром (диапазон энергии ионов 50...500 эВ, плотность ионного тока 2...20 мА/см<sup>2</sup>). ИИ УЗДП имеет овальную форму канала ускорения, что позволяет обеспечить равномерность травления перемещением подложки только в одном направлении — перпендикулярно протяженным участкам канала анода.

Для формирования топологического рисунка ГИС СВЧ, размещаемых на достаточно больших площадях (48×60 мм и более), целесообразно использо-

вать ИИ типа Кауфмана в варианте МАИ 208 2Т [9] (см. **табл. 5**, где неравномерность травления соответствует оптимальному режиму работы ИИ).

Таблица 5

*Сравнительные характеристики источников ионов*

| Тип источника ионов | Плотность тока, мА/см <sup>2</sup> | Диапазон энергий, эВ | Размер пучка, мм | Неравномерность травления неподвижного образца |
|---------------------|------------------------------------|----------------------|------------------|--|
| МАИ 208 2Т          | 0,5...3,0                          | 500...2000           | 100              | 5% на Ø300 мм                                  |
| УЗДП                | 5,0...25,0                         | 2...20               | —                | 5% на 40×40 мм                                 |

Таким образом, существенного улучшения точности получения геометрических размеров (уменьшения случайной составляющей погрешности) можно добиться методом ионного травления, реализованным с помощью ионного источника типа Кауфмана. При этом из существующих моделей источников этого типа следует отдать предпочтение источнику МАИ 208 2Т, обеспечивающему высокую равномерность травления на достаточно большой площади.

Применение этого метода обеспечивает также более четкое (по отношению к применяемому методу жидкостного травления) формирование края проводников. Исключение неоднородностей на границе «подложка — проводник» может происходить за счет:

- применения подложек, имеющих высокий класс чистоты обработки поверхности;
- нанесения материалов проводников без нанесения адгезионного подслоя.

Решение первой задачи обеспечивается выбором материала подложки, решение второй — выбором для данного материала подложки материала проводящего слоя и соответствующего метода и режима нанесения.

Выбор материала проводящего слоя весьма ограничен. Высокой проводимостью обладают медь, алюминий, золото, серебро, а также сплавы этих материалов. Высокая адгезия к подложке любого материала обеспечивается образованием химических связей этого материала с материалом подложки. Более всего такие связи могут возникнуть у алюминия к подложкам, содержащим в своем составе окислы (некомпенсированные кислородные связи вступают во взаимодействие с Al, имеющим высокое значение теплоты образования окисла). Вероятность образования химических связей повышается при активации поверхности подложки энергетическим воздействием. Поэтому предпочтение следует отдавать методам, обеспечивающим высокие энергии атомов молекул распыляемого материала.

К таким методам следует отнести, прежде всего, магнетронное и ионно-плазменное распыление материалов. Известно, что применение магнетронного метода обеспечивает получение толстых пленок (10 мкм) металлов и сплавов на различные подложки, включая полимерные [10]. Высокая адгезия достигается подбором оптимального режима распыления (температура подложки, давление рабочего газа).

\*\*\*

Таким образом, основные задачи реализации пленочных ГИС сверхвысоких и крайне высоких частот состоят в выборе материала подложки, методов

точного формирования проводников (малое значение случайной составляющей погрешности), методов и режимов осаждения металлов с высокой проводимостью без адгезионного подслоя.

Указанные задачи с большей вероятностью могут быть успешно решены при применении полимерных подложек (например, фторопластовых), методов ионного травления с использованием источника ионов типа Кауфмана, имеющего ионно-оптическую систему, и при использовании магнетронного распыления металлов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Tokumitsu Y., Ishizaki M., Iwakuni M., Saito T. 50-GHz Ic components using alumina substrates // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — 1983. — Vol. MTT-31, N 2. — P. 121—128

2. Воскресенский Д. И., Максимов В. М. и др. Антенны и устройства диапазона миллиметровых волн // Радиоэлектроника. — 1985. — Т. 28, № 2. — С. 4—23.

3. Бушминский И. П., Гудков А. Г. Экспериментальные исследования потерь в МПЛ // Вопросы радиоэлектроники. — 1982. — Вып. 2. — С. 88—94.

4. Бушминский И. П., Гудков А. Г., Куратов П. А. Вероятностное моделирование волнового сопротивления МПЛ // Вопросы радиоэлектроники. — 1982. — Вып. 6. — С. 38—53.

5. Сухие методы травления в производстве ИС // Радиоэлектроника за рубежом. — 1985. — № 15. — С. 5—28.

6. Ким В., Киреев В. Ю. Ионно-лучевое травление материалов ионами низких энергий // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1983. — Вып. 3. — С. 69—74.

7. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Кузнецов В. И. Вакуумно-плазменные процессы травления микроструктур. Классификация и сопоставление процессов травления. Генерация химически активных частиц в низкотемпературной плазме // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1982. — Вып. 2. — С. 3—9.

8. Орлов В. И. Применение ионно-плазменных процессов в производстве изделий электронной техники // Обзоры науч.-техн. литературы по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. — 1979. — Вып. 11.

9. Григорян В. Г., Гушин М. Б., Иванов Р. Д. и др. Ионно-лучевой источник для травления рисунка ИС с микронными и субмикронными размерами элементов // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1979. — Вып. 2. — С. 106—111.

10. Воробьев В. Н. Выбор оптимальных режимов магнетронного распыления при металлизации полимерных подложек // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1985. — Вып. 7. — С. 65—70.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

### 4-я Международная научно-техническая конференция «ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА — 2002» («ЭлИнф-2002»)

Россия, Москва,  
МИЭТ (технический университет)  
20—22 ноября 2002 г.

#### Научные направления

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Физика и технология микро- и нано-электроники.</li> <li>2. Материалы и оборудование электронной техники.</li> <li>3. Проектирование электронных компонентов и систем.</li> <li>4. Микросистемы и микромеханика.</li> <li>5. Информационные и управляющие системы.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6. Телекоммуникационные системы и связь.</li> <li>7. Биомедицинская электроника.</li> <li>8. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.</li> <li>9. Менеджмент и маркетинг в электронике и информатике.</li> <li>10. Гуманитарные проблемы информатизации.</li> </ol> |
|--|---|

#### Адрес Оргкомитета:

103498, Москва, К-498,  
Московский государственный институт  
электронной техники (МИЭТ), ОНТИ.

**Отв. секретарь** Харач Валентина Павловна.

Тел.: (095) 532-98-30. Факс: (095) 530-54-29. E-mail: id@rnd.miee.ru