

Оценка стабильности и воспроизводимости технологического процесса металлизации через свободную маску

О. Почтарь¹, А. Почтарь²

УДК 539.234 | ВАК 2.2.10

Статистические методы контроля технологических процессов – эффективный инструмент обработки новых технологий, повышения качества выпускаемой продукции, снижения производственных затрат. В статье представлена оценка стабильности и воспроизводимости технологического процесса двухслойной металлизации кристаллов ниобата лития через свободную металлическую маску методом электронно-лучевого испарения, предложены рекомендации по отладке данного технологического процесса. Оценка выполнена на основе статистической обработки экспериментальных данных (ширина зазора и величина подпыления) с применением контрольных карт Шухарта.

СТАТИСТИКА В ТЕХНОЛОГИИ

Как известно, контроль качества выпускаемой продукции может осуществляться различными методами, которые можно разделить на две большие группы: контроль качества изготавливаемых изделий и контроль технологических процессов.

При контроле качества изготавливаемых изделий вероятны дефекты изготовления, которые могут привести к ранним отказам и необходимости переделки изделия. Однако при увеличении объемов производства такой подход перестает быть эффективным, и целесообразным становится переход к контролю технологических процессов. Такой метод контроля продукции позволяет минимизировать вероятность появления дефектов изготовления.

Инструментом для контроля технологических процессов являются статистические методы, в частности применение контрольных карт Шухарта, которые позволяют оценить стабильность и воспроизводимость технологических процессов, обнаружить и устранить особые причины изменения свойств продукции, приводящие к выпуску изделия, несоответствующего конструкторским требованиям.

Обработка любой технологии включает в себя проведение серии экспериментов по подбору режимов и необходимой оснастки. При разработке технологии металлизации кристаллов подбираются режимы металлизации и соответствующая оснастка – свободная металлическая маска. Режимы металлизации влияют на толщину и молекулярный состав покрытия, а также на зародышеобразование (поведение осаждаемых атомов на поверхности кристалла) [1]. Конфигурация оснастки определяет топологию металлизации.

Оснастка разрабатывается индивидуально под каждый тип кристалла и должна обеспечивать изготовление продукции, соответствующей требованиям конструкторской документации. Также необходимо, чтобы оснастка, при прочих равных условиях технологического процесса, обеспечивала стабильный и воспроизводимый процесс металлизации кристаллов. Для проверки оснастки на соответствии указанным требованиям возможны два подхода:

- последовательное изготовление оснастки с различными геометрическими размерами и экспериментальное определение соответствия топологии металлизации конструкторской документации при использовании каждого типа оснастки;
- применение статистических методов анализа процесса (в частности, использование контрольных карт Шухарта).

Последовательное изготовление оснастки нецелесообразно ввиду неэффективного расхода рабочего времени специалистов.

¹ АО «УПКБ «Деталь», инженер-технолог 3 категории – руководитель группы, тел.: +7 902 261-29-08, oleg_p20@mail.ru.

² АО «УПКБ «Деталь», начальник сектора, тел.: +7 906 948-44-10, ananpochtar@gmail.com.

Применение статистических методов, а именно контрольных карт Шухарта, позволяет оценить стабильность процесса, а также обнаружить и устранить особые причины изменения свойств продукции, приводящие к получению изделия, несоответствующего конструкторским требованиям [2]. Это дает возможность не только подобрать оптимальные размеры оснастки, но и выявить зависимость влияния геометрических размеров оснастки на размеры элементов топологии металлизации. Определение такой зависимости обеспечит возможность перехода от контроля технологического процесса к его управлению, то есть позволит в дальнейшем изготавливать кристаллы с иной топологией металлизации без проведения длительных экспериментов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Металлизированный кристалл (рис. 1) представляет собой кристалл ниобата лития (LiNbO_3) цилиндрической формы с нанесенными на одну торцевую сторону субмикронными слоями ванадия и никеля через свободную металлическую маску.

Свободная маска необходима для формирования металлических контактов заданных размеров, разделенных зазором, который обеспечивается перемычкой маски. Процесс металлизации выполнялся методом электронно-лучевого испарения (рис. 2).

Ширина зазора между металлическими контактами является основной контролируемой величиной, которая обеспечивается размерами элементов в маске. Ширина зазора измеряется по всей длине зазора. Так как от ширины зазора зависит работоспособность изделия, необходимо оценить стабильность технологического процесса

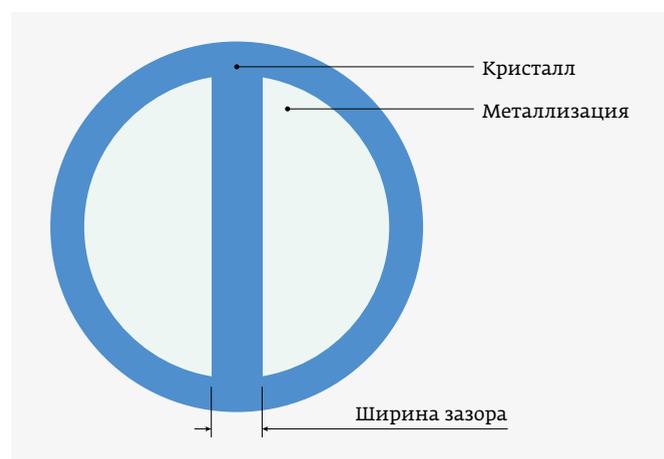


Рис. 1. Торцевая поверхность кристалла со сформированной топологией металлизации

металлизации кристаллов, а также выявить факторы, влияющие на эту величину.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Параметром технологического процесса металлизации, влияние которого на стабильность процесса оценивается в работе, является ширина перемычки свободной металлической маски.

В работе использовалось два вида масок с одинаковой толщиной, но с разным значением ширины перемычки. В процессе отработки технологии было обнаружено, что на готовых кристаллах наблюдается уменьшение ширины зазора относительно ширины перемычки, что объясняется процессом подпыления материалов под свободную металлическую маску.

Таким образом, влияние ширины перемычки маски на стабильность и воспроизводимость технологического процесса металлизации кристаллов первично оценивается через оценку величины подпыления. Для этого были построены контрольные карты Шухарта для величины подпыления на одну сторону зазора (рис. 3), где $UNPL_x$ – верхняя контрольная граница; CL_x – центральная линия (математическое ожидание); $LNPL_x$ – нижняя контрольная граница.

Каждый результат представляет собой один отдельный запуск процесса металлизации, поэтому краткосрочная вариация величин подпыления для последовательности

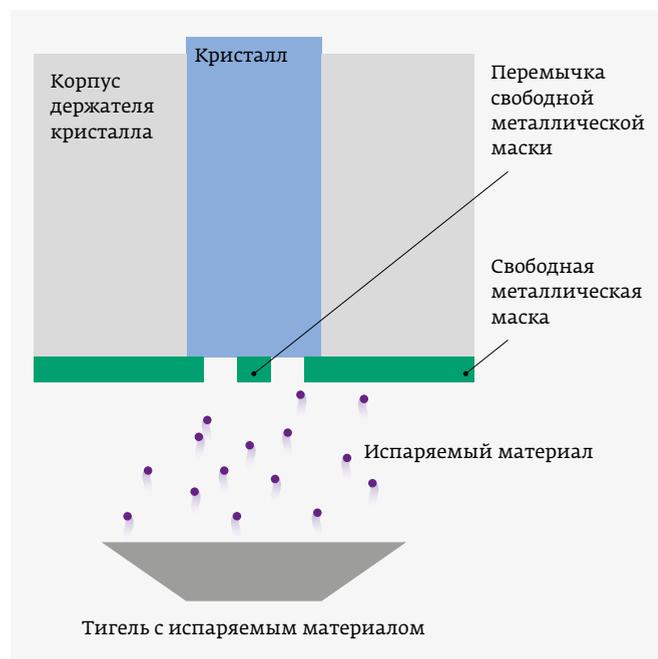


Рис. 2. Схема процесса металлизации кристалла через свободную маску (без соблюдения масштаба)

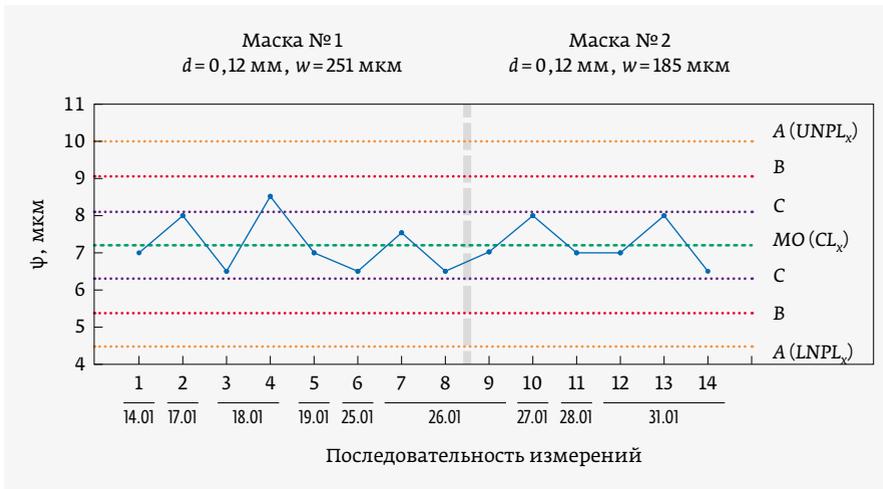


Рис. 3. Контрольная карта Шухарта с обозначенными контрольными пределами для величины подпыления на одну сторону зазора: А – границы $\pm 3\sigma$; В – границы $\pm 2\sigma$; С – границы $\pm \sigma$; МО – математическое ожидание

индивидуальных значений была представлена как вариация от одной точки к другой [3].

Модуль скользящего размаха – это модуль разницы между двумя последующими значениями измеряемого параметра. Он отражает скорость изменения процесса, то есть является производной функцией процесса. Для построения контрольных карт Шухарта не нужно подтверждение нормальности распределения, так как метод контрольных карт не чувствителен к этому [3]. Но без точного определения типа распределения данных нельзя однозначно определить закон, по которому вычисляется производная функции процесса, поэтому для корректного анализа стабильности процесса необходимо отдельно производить оценку модуля скользящего размаха (рис. 4).

На основании экспериментальных данных, отраженных на контрольных картах Шухарта (см. рис. 3 и 4), были рассчитаны значения средней величины подпыления

на одну сторону зазора $\bar{\psi}$ и средний скользящий размах: $\bar{\psi} = 7,214$ мкм; $\bar{mR} = 1,038$ мкм.

Были рассчитаны величины пределов контрольных карт Шухарта [2]:

- для величины подпыления на одну сторону зазора: $UNPL_x = 9,976$ мкм; $CL_x = 7,214$ мкм; $LNPL_x = 4,452$ мкм;
- для скользящего размаха величины подпыления на одну сторону зазора: $UCL_r = 3,394$ мкм; $CL_r = 1,038$ мкм; $LCL_r = 0,000$ мкм (поскольку отрицательного значения физически быть не может).

Расстояние между $UNPL_x$ и CL_x для величины подпыления на одну сторону зазора и расстояние между UCL_r и CL_r для скользящего размаха принимаются за величину 3σ (σ – среднее квадратическое отклонение) [4]. Исходя из этого были рассчитаны величины 2σ и σ . Данные величины отражены на контрольных картах Шухарта.

При анализе контрольных карт Шухарта индивидуальных значений и скользящего размаха было выявлено, что 13

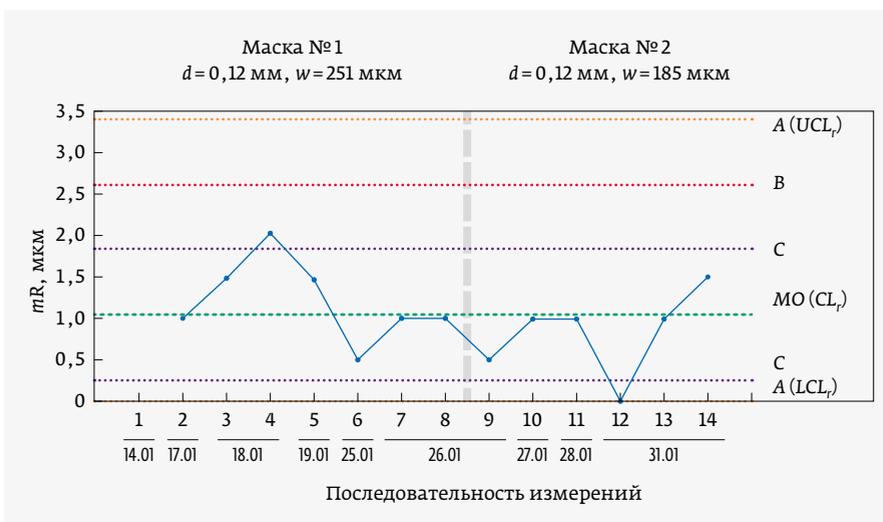


Рис. 4. Контрольная карта Шухарта с обозначенными контрольными пределами для модуля скользящего размаха величины подпыления на одну сторону зазора: А – границы $\pm 3\sigma$; В – границы $\pm 2\sigma$; С – границы $\pm \sigma$; МО – математическое ожидание

из 14 точек (92,8%) на графике подпыления на одну сторону зазора лежат в пределах $\pm\sigma$, а также 14 из 14 точек (100%) лежат в пределах $\pm 2\sigma$, а соответственно и в пределах $\pm 3\sigma$.

Полученные данные укладываются в эмпирические правила определения стабильности процесса [3]. Процесс остается стабильным при замене свободной металлической маски: значения величин зазоров не выходят за пределы статистических границ $\pm 3\sigma$. Данный факт подтверждает, что ширина перемычки не оказывает влияния на стабильность процесса и величину подпыления на одну сторону зазора. Однако ширина перемычки маски влияет на фактическую величину получаемого зазора.

Для оценки фактической получаемой ширины зазора были построены контрольные карты Шухарта для индивидуальных значений ширины зазора (рис. 5) и рассчитаны статистические пределы по двум различным маскам:

- для маски с шириной зазора 251 мкм:
 $UNPL_x = 243,08$ мкм; $CL_x = 236,62$ мкм;
 $LNPL_x = 230,16$ мкм;
- для маски с шириной зазора 185 мкм:
 $UNPL_x = 175,28$ мкм; $CL_x = 170,50$ мкм;
 $LNPL_x = 165,71$ мкм.

Ширина зазора, установленная конструкторской документацией, составляет: $b = 200 - 240$ мкм.

По данным рис. 5 видно, что при металлизации через маску № 2 контрольные пределы и полученные результаты измерений находятся ниже значения, установленного конструкторской документацией, что говорит о невозможности использовать такую маску для металлизации кристаллов. При металлизации через маску № 1 наблюдается превышение значением $UNPL_x = 243,08$ мкм максимального значения ширины зазора, установленного конструкторской документацией. Такой результат говорит о том, что имеется вероятность несоответствия изделия техническим требованиям при сохранении стабильности технологического процесса.

Для анализа воспроизводимости процессов металлизации кристаллов были рассчитаны индексы воспроизводимости C_p для данных по двум маскам: $C_{p(маска\ 1)} = 3,09$ и $C_{p(маска\ 2)} = 4,11$. Так как процессы, согласно [4], имеют естественный допуск $\pm 3\sigma$, и величина C_p для обоих случаев больше 1,33

(коэффициент воспроизводимости процесса), то можно говорить о стабильности и воспроизводимости процесса. Однако, очевидно, что процесс нуждается в центровке (смещение величины математического ожидания к центру).

Проведенный статистический анализ позволяет рассчитать требуемые геометрические размеры маски для обеспечения заданной конструкторской документацией ширины зазора, без экспериментального подбора конфигурации оснастки.

Для смещения статистических границ процесса металлизации кристаллов внутрь конструкторских границ необходимо смещение математического ожидания (CL_x) до 220 мкм (см. рис. 5). При возможном отклонении ширины зазора в диапазоне $\pm 3\sigma$ процесс, находящийся в стабильном состоянии, будет обеспечивать сохранение ширины зазора согласно допуску по конструкторской документации $b = 220 \pm 20$ мкм.

Установлено, что величина подпыления на одну сторону зазора составляет 7,2 мкм (математическое ожидание для величины подпыления на одну сторону зазора). Исходя из полученных данных с помощью соотношения (1)

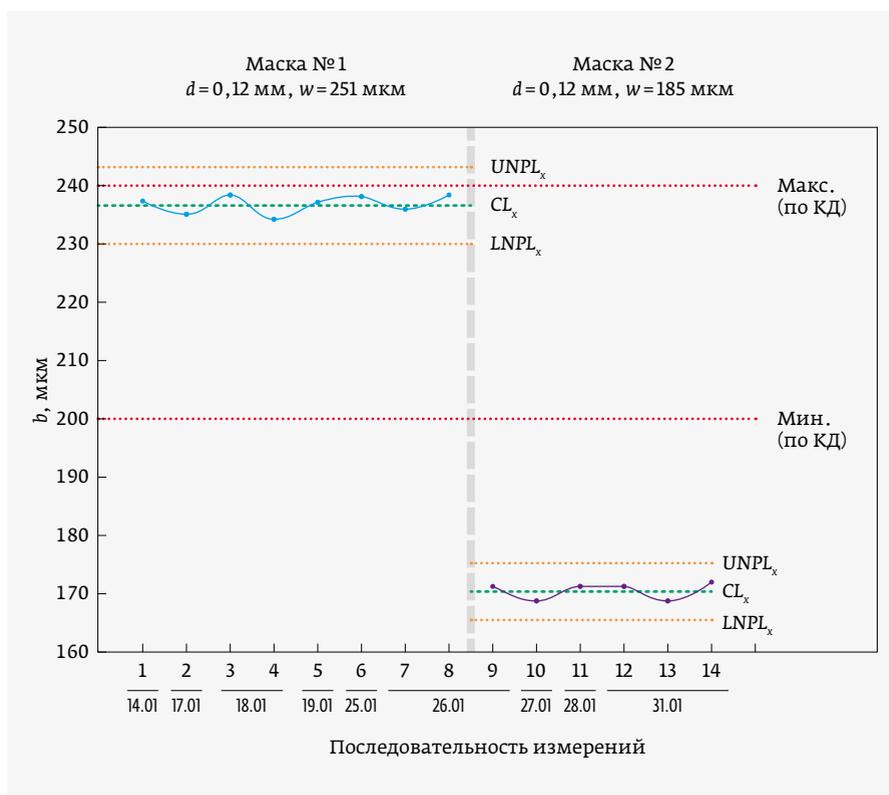


Рис. 5. Контрольные карты Шухарта для индивидуальных значений ширины зазора с обозначенными контрольными пределами: $UNPL_x$ – верхняя контрольная граница; CL_x – центральная линия (математическое ожидание); $LNPL_x$ – нижняя контрольная граница

рассчитывается ширина перемычки металлической маски, которая обеспечит зазор 220 мкм:

$$w = b + (2 \cdot \psi). \quad (1)$$

Подставим численные значения в формулу (1):

$$w = 220 + (2 \cdot 7,2) = 234,4 \text{ мкм.}$$

Для удобства изготовления металлической маски полученное значение ширины перемычки было округлено до $w = 240$ мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методами статистической обработки результатов технологического процесса была доказана стабильность и воспроизводимость процесса металлизации кристаллов.

На основе полученных данных вынесены рекомендации по отладке технологического процесса: для получения стабильного процесса металлизации кристаллов с шириной получаемого зазора, укладываемого в допуски, установленные конструкторской документацией $b = 220 \pm 20$ мкм, необходимо использовать свободную металлическую маску толщиной 0,12 мм и шириной перемычки $w = 240$ мкм.

Для дальнейшего повышения однородности процесса и уменьшения величины среднего квадратического отклонения необходимо рассмотреть факторы, влияющие

на величину подпыления. Такими факторами являются: температура кристалла в процессе металлизации и температура испаряемых материалов в тигле, которую можно варьировать путем изменения тока луча электронно-лучевой пушки. Уменьшив разброс значений величины подпыления, появится возможность изготовления кристаллов с шириной зазора, близкой к величине математического ожидания.

В результате проведенной работы получена замкнутая модель производственного процесса металлизации кристалла из LiNbO_3 слоями ванадий-никель через свободную металлическую маску методом электронно-лучевого испарения с формированием заданной топологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А., Смирнов Б.** Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // НАНОИНДУСТРИЯ. 2012. № 6 (36). С. 28–34.
2. **Локтев Д. А.** Статистическое управление производственными процессами – ключ к успеху современного промышленного предприятия // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. № 1(19), т. 2. С. 128–136.
3. **Уилер Д., Чамберс Д.** Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Пер. с англ., 2-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2016. 582 с.
4. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Ч. 2. М., 2015. 46 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 402 с.,
ISBN 978-5-94836-512-1

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru



КУЛОН
общество с ограниченной ответственностью

завод по производству пассивных
электронных компонентов

www.kulon.spb.ru

192019, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Качалова, д. 3, литер К
Тел.: +7 (812) 317-33-04 | E-mail: office@kulon.spb.ru, sale@kulon.spb.ru