

Введение: вопрос идентификации слитка меди 6N

Данное исследование берет начало в техническом споре: слиток изотопной меди, прошедший проверку в Российской Федерации и сертифицированный как «6N» (чистота 99,9999%), после доставки в Китай был подвергнут повторному анализу в соответствии с национальными отраслевыми стандартами для медных мишеней, применяемых в полупроводниковой промышленности. Результаты показали значительное несоответствие заявленным характеристикам: фактическая химическая чистота не достигала уровня 6N, при этом концентрации ряда примесных элементов существенно превышали допустимые значения.

Выявленное расхождение инициировало дискуссию о природе проблемы: является ли ситуация следствием низкого качества продукции в рамках трансграничной поставки или же результатом различий в отраслевых стандартах и определениях уровня чистоты?

Ключевым вопросом стало следующее: существенные расхождения в результатах анализа обусловлены особенностями конечного применения и эксплуатационных требований либо принципиальными различиями в трактовке понятия «6N» применительно к изотопной меди и меди, используемой для мишеней распыления? Иными словами, предполагаемые области применения изотопной меди изначально могут не предусматривать необходимости проведения комплексного контроля (включающего до 70 потенциальных примесных элементов), обязательного для медных мишеней, используемых в полупроводниковой промышленности.

Данный «вопрос идентификации» не является единичным случаем. Он наглядно отражает тенденцию к углубляющейся сегментации и специализации в области материаловедения в условиях развития высокотехнологичных отраслей. Настоящая работа использует данный пример в качестве исходной точки и предлагает системный анализ поэтапно.

Вначале будет рассмотрено различие в интерпретации термина «6N» применительно к разным технологическим контекстам. Далее — проведено сравнение изотопной меди и меди, используемой для мишеней распыления, с акцентом на различия в ключевых областях применения и эксплуатационных характеристиках. Затем, на основе конкретных протоколов испытаний, предоставленных пользователем, будет выполнен эмпирический анализ с целью продемонстрировать различие фокуса в двух системах стандартизации. В заключение рассмотрены причины возникновения явления «несовпадения стандартов» с точки зрения отраслевого развития.

Цель анализа — прояснить вопрос идентификации «слитка меди 6N» и предоставить специалистам, работающим в сфере закупок, исследований и применения высокотехнологичных материалов, практические выводы и рекомендации.

Основной анализ: две интерпретации «6N» — чистота, определяемая сценарием применения

В материаловедении для высокотехнологичных отраслей действует фундаментальный принцип: характеристики материала определяются сферой применения, а стандартизация — требованиями к характеристикам. Таким образом, понятие «чистоты» не является универсальной и абсолютной категорией. Его содержание, критерии и методы оценки полностью зависят от конечного применения. Проблема, с которой столкнулся пользователь, во многом обусловлена смешением двух ключевых понятий: «химическая чистота» и «изотопная чистота».

Сценарий 1: медь для мишеней распыления — стремление к предельной химической чистоте

В технологии производства полупроводников медные мишени выполняют критически важную функцию, выступая своеобразными «чернилами». Их назначение заключается в формировании при помощи процесса физического осаждения из паровой фазы (Physical Vapor Deposition, PVD) металлических сетей проводников (медных межсоединений), размеры которых в тысячи раз меньше диаметра человеческого волоса, на поверхности кремниевых пластин, либо в создании проводящих электродов на дисплейных панелях.

Требования к применению и ключевые уязвимости

Процесс осаждения можно представить как работу ультравысокоточной «атомной пушки», которая выбивает медные атомы с поверхности мишени и равномерно наносит их на поверхность кристалла. В наномасштабе любое присутствие атомов-примесей может привести к катастрофическим последствиям.

Примеры критически опасных загрязнений:

Щелочные металлы (Na, K): подвижные ионы легко мигрируют в диэлектрических слоях (например, в оксиде затвора транзистора), что приводит к изменению порогового напряжения и нарушению работы логики кристалла.

Тяжёлые металлы (Fe, Ni, Cr): образуют в кристаллической решётке кремния глубокие уровни ловушек, функционирующие как центры рекомбинации электронов и дырок, что значительно сокращает время жизни носителей заряда и вызывает токи утечки, деградацию параметров.

Радиоактивные элементы (U, Th): при распаде выделяют α -частицы, которые способны повреждать ячейки памяти и вызывать «мягкие ошибки» (Soft Error), приводящие к инверсии хранимых данных.

Газообразные примеси (O, N, C): формируют оксиды и нитриды в осаждённых медных плёнках, повышают удельное сопротивление, ухудшают скорость передачи сигнала, а также могут образовывать пустоты в процессе термообработки, вызывая обрыв проводящих цепей.

Именно из-за «нулевой толерантности» к данным загрязнениям полупроводниковая отрасль предъявляет крайне жёсткие требования к чистоте мишеней. Электропроводность, адгезия, равномерность и надёжность плёнки напрямую зависят от химической чистоты исходного

материала. Любое незначительное загрязнение способно привести к браку кремниевых пластин стоимостью в миллионы долларов, снижая выход годных и конечные характеристики продукции.

Согласно отраслевым исследованиям, уровень чистоты мишеней напрямую коррелирует с чистотой формируемой тонкой плёнки. Для обеспечения производственных процессов в микро- и наноразмерных технологиях обычно требуется чистота не ниже 99,9995% (5N5), а в ряде случаев — до уровня 6N и выше.

Определение и стандартизация «6N»

В контексте мишеней для распыления термин «6N» (99,9999%) имеет однозначное толкование: химическая чистота. Это означает, что суммарное содержание всех примесных элементов, помимо матрицы Si, должно быть менее 1 ppm (одна миллионная доля по массе).

Для обеспечения этого требования разработаны строгие нормативные документы. Наиболее показателен китайский национальный стандарт GB/T 26017-2020 «Высокочистая медь», который определяет уровни чистоты (от 5N до 7N) и предписывает полный спектральный анализ всех потенциальных загрязняющих элементов.

На практике контроль охватывает более 70 элементов периодической системы. Например, в «Руководстве по демонстрационному применению новых материалов первой категории» (Пекин) установлено, что для медных мишеней, применяемых при производстве 300-мм кремниевых пластин, чистота должна составлять не менее 6N, при этом жёстко ограничены допустимые уровни загрязнений:

содержание металлических примесей $\leq 0,2$ ppm,

содержание неметаллических примесей ≤ 1 ppm.

Логика контроля заключается в том, что для медных мишеней любой атом, отличный от меди, потенциально является дефектом и должен быть выявлен и исключён. Следовательно, система анализа строится на принципе сочетания «широты» и «глубины» проверки, не оставляя без внимания ни одного элемента, способного нанести ущерб.

--

Сценарий 2: изотопная медь — приоритет изотопной чистоты

С изменением точки зрения мы переходим в совершенно иную область — применение изотопной меди. Здесь ключевыми сферами выступают сверхпроводящие кубиты квантовых вычислителей, элементы ядерных термоядерных реакторов, а также высокоточные медицинские диагностические реагенты.

Требования к применению и ключевая ценность

Ценность изотопной меди заключается не в её абсолютной химической чистоте, а в уникальном изотопном составе. В природе медь представлена двумя стабильными изотопами — Cu-63 (ядро содержит 34 нейтрона, естественная распространённость $\approx 69,17\%$) и Cu-65 (ядро содержит 36 нейтронов, распространённость $\approx 30,83\%$). Изотопная медь — это продукт высокотехнологичных процессов (лазерное разделение, газовая центрифуга, электромагнитное разделение и др.), позволяющих выделить один из изотопов с экстремально высокой степенью обогащения, например, Cu-63 с концентрацией более 99,9%.

Причина необходимости столь сложного разделения связана с тем, что в ряде передовых применений незначительные различия в физических характеристиках изотопов усиливаются многократно:

Квантовые вычисления. Работа кубитов чрезвычайно чувствительна к «шумам» окружающей среды. Различия в ядерных спинах изотопов Cu-63 и Cu-65 вызывают флуктуации магнитного поля, что приводит к декогеренции — одной из основных проблем квантовых процессоров.

Применение меди, обогащённой одним изотопом, позволяет сформировать более стабильную и однородную электромагнитную среду, значительно увеличивая время когерентности и стабильность вычислений. Кроме того, различия в фоновых спектрах изотопов отражаются на теплопроводности при низких температурах, что критически важно для квантовых чипов, функционирующих вблизи абсолютного нуля.

Ядерная энергетика и исследования. Cu-63 и Cu-65 имеют существенно разные сечения взаимодействия с нейтронами. В проектировании реакторов выбор изотопа позволяет создавать конструкции с заданным взаимодействием (или минимизацией взаимодействия) с нейтронным потоком. Например, Cu-63 используется при исследованиях энерговыделения в реакторах, а Cu-65 — при изучении отвода энергии в оболочках.

Производство медицинских изотопов. Радиоактивный изотоп Cu-64 (период полураспада 12,7 ч) применяется в ПЭТ-диагностике и терапии онкологических заболеваний. Его получают облучением мишеней в ускорителях или реакторах. Использование обогащённых изотопов Cu-63 или Cu-65 значительно повышает выход Cu-64 и удельную активность, сокращая количество побочных продуктов.

--

Определение и стандарты «6N» для изотопной меди

В контексте изотопной меди использование маркировки «6N» неоднозначно и может вводить в заблуждение. Чаще всего она указывает на достижение химической чистоты на уровне 99,9999%, однако данное свойство не является ключевым критерием качества. Главным параметром изотопной меди является изотопная чистота (Isotopic Purity), например «Cu-63 ≥ 99,7%».

Соответственно, система контроля качества изотопной меди принципиально отличается от требований к мишеням для распыления. Основное внимание уделяется точному определению соотношения Cu-63/Cu-65. Контроль химических примесей осуществляется по принципу «приоритет ключевых элементов, минимизация избыточных процедур».

В ядерных приложениях акцент делается на элементах с высоким сечением поглощения нейтронов (B, Cd, Gd).

В квантовых технологиях жёстко контролируются магнитные примеси (Fe, Co, Ni).

Это объясняет, почему российские протоколы испытаний охватывают всего 11 элементов. Это не свидетельствует о технологической ограниченности, а отражает целеориентированную стратегию контроля качества, при которой основная задача — обеспечить высокую изотопную чистоту, тогда как контроль химических примесей носит вспомогательный характер.

Таким образом, многие загрязнители, критичные для полупроводников (например, P, S, Zn), в данных областях применения не оказывают значимого влияния и не требуют дорогостоящего тотального анализа.

Закключение: различие стандартов определяется областью применения, а не качеством продукции

Различие в результатах испытаний объясняется не «хорошим» или «плохим» качеством продукции, а несовпадением стандартов, обусловленным сферой применения.

Российские испытания были направлены на подтверждение соответствия изотопной меди её целевому назначению. Результаты показали корректное соотношение изотопов и допустимые уровни 11 контролируемых примесей. Для поставщика и потребителя изотопной меди продукт является «соответствующим требованиям».

Китайские испытания проводились с позиций применения в полупроводниковой отрасли и верифицировались по стандарту GB/T 26017-2020, предполагающему контроль более чем 70 элементов. С этой позиции образец не соответствует требованиям по химической чистоте.

Следовательно, спорная ситуация не связана с дефектностью продукции, а отражает фундаментальное несоответствие области применения и применяемой системы стандартов. Исследуемый слиток может являться высокоценным продуктом изотопной меди, однако он изначально не предназначался для применения в качестве мишени для распыления. Попытка использовать его в такой роли эквивалентна применению высокоточного «хирургического инструмента» в качестве «топора» — это неэффективно, рискованно и ведёт к ресурсным потерям.

Доказательная база: различие акцентов в российских и китайских испытаниях

Теоретические рассуждения должны подтверждаться эмпирическими данными. В распоряжении имеются два ключевых документа: детальный отчёт о 70-элементном анализе и сравнительное описание расхождений в стандартах РФ и КНР. Эти материалы позволяют наглядно продемонстрировать принципиальные различия в объектах контроля.

Китайские стандарты (на примере отчёта пользователя).

Отчёт отражает специфику контроля в полупроводниковой отрасли: высокая точность и полнота охвата.

Методика и точность: указано применение стандарта YS/T 922 (вероятно, методика анализа высокочистых металлов, например, методика GDMS). Использован мас-спектрометр с тлеющим разрядом (Glow Discharge Mass Spectrometry, GDMS), являющийся признанной технологией для анализа сверхмалых концентраций элементов в твёрдых материалах. GDMS обеспечивает пределы обнаружения на уровне ppb (10^{-9}) и даже ppt (10^{-12}), что полностью соответствует требованиям полупроводниковой промышленности.

Ключевые результаты: наибольший интерес представляют концентрации отдельных примесных элементов. Для наглядности отклонения от требований 6N были обработаны и представлены в визуализированной форме.

Интерпретация и оценка влияния

Из графиков и таблиц видно, что содержание ряда примесей в этом слитке меди превышает требования к медным мишеням для распыления в десятки и даже сотни раз. Эти примеси критически важны для полупроводникового производства:

P (Фосфор): 13,46 ppm и S (Сера): 11,19 ppm — неметаллические элементы, которые серьёзно влияют на электрические и механические свойства медной плёнки, увеличивают сопротивление и могут вызывать сегрегацию на границах кристаллов, приводя к электромиграции и снижению срока службы чипа.

Fe (Железо): 18,21 ppm — сильный магнитный примесный элемент, который нарушает электромагнитное поле внутри чипа, недопустим для приложений с точным контролем магнитного поля (например, MRAM). Его содержание почти в 100 раз превышает стандарт 0,2 ppm.

Zn (Цинк): 45,32 ppm — высокое содержание цинка изменяет свойства медного сплава, включая работу выхода и проводимость, что делает характеристики пленки непредсказуемыми.

Ag (Серебро): 15,69 ppm — несмотря на хорошую проводимость, серебро в меди имеет ограниченное растворение, легко выделяется на границах кристаллов, изменяет микроструктуру пленки и внутренние напряжения, снижая надёжность.

Эта отчётность, охватывающая 70 элементов с точностью до уровня ppb, демонстрирует экстремальные требования полупроводниковой отрасли к «химической чистоте» мишеней для распыления. Любое отклонение от чистой меди рассматривается как потенциальная «загрязняющая примесь», подлежащая устранению.

Сравнение российских и китайских стандартов

Российский стандарт (по описанию пользователя) и китайская «полная проверка» показывают явное различие. Российские проверки направлены на целенаправленный контроль ключевых примесей, а не на полное оценивание химической чистоты:

Область проверки и ключевые элементы: проверка охватывает лишь 11 элементов (Li, Be, Ti, V, Co, Mo, Cd, Pt, Au, Bi, Cu), что указывает на специфический характер проверки, ориентированной на определённые сценарии применения (например, ядерная физика, квантовые эксперименты). Эти элементы критичны для конкретных приложений: лёгкие элементы (Li, Be, B) — особое поведение в ядерных реакциях; Cd — известный поглотитель нейтронов; Co — может образовывать радиоактивный Co-60.

Истинный фокус: изотопное содержание

Ключевой параметр для пользователей — относительное содержание изотопов:

Китайские данные: Cu-63 = 69,05%, Cu-65 = 30,95%

Российские данные: Cu-63 = 69,09%, Cu-65 = 30,91%

Эти значения близки к естественному распределению изотопов меди (Cu-63 $\approx$ 69,17%, Cu-65 $\approx$ 30,83%) и совпадают в пределах допустимой погрешности измерений. Это подтверждает, что слиток представляет собой натуральную медь с изотопным распределением, а не обогащённый изотоп.

Причины «несоответствия стандартов»

Несоответствие «6N медного слитка» не случайно, а обусловлено:

1. Различием производственных технологий:

Высокочистая химическая медь (для распыления) — фокус на химическом разделении, удаление всех примесей.

Изотопная медь — фокус на физическом разделении изотопов; химические примеси контролируются только до уровня, не влияющего на физические свойства.

2. Разделением рынков и цепочек поставок:

Рынок мишеней для распыления — массовый, стандартизированный, прозрачный.

Рынок изотопной меди — стратегический, малые объёмы, закрытые стандарты.

3. Маркетинговое использование «6N»:

Этикетка «6N» может быть применена для химически чистой меди, вводя в заблуждение покупателей, которые ожидают соответствия полупроводниковым стандартам.

Выводы и рекомендации

1. Не полагаться на ярлыки: Проверять материалы по полным отчетам анализа (COA), а не по маркировке «5N», «6N», «7N».
2. Точное определение требований: Чётко указывать назначение материала и соответствующие отраслевые стандарты (например, GB/T 26017-2020 для HPCu-6N).
3. Понимать профессиональные различия: Материалы имеют разные «якоря ценности»: химическая чистота, изотопная чистота, кристаллическая структура и т.д. Только понимание этих параметров позволяет использовать материал по назначению и реализовать его максимальную ценность.

В итоге, спор о «6N изотопной меди» не является вопросом мошенничества или ошибки, а отражает разницу в требованиях применения. Правильная интерпретация и проверка стандартов позволяет избежать потерь ресурсов и экономических убытков.

ССЫЛКИ:

参考资料

[1] 溅射靶材- P5 半导体行业应用 - 知乎专栏

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/536052260>

[2] [DOC] <http://www.cnsmq.com/uploadfile/2019/1023/20191023...>

<http://www.cnsmq.com/uploadfile/2019/1023/20191023113920358.docx>

[3] 高纯度同位素铜粉市场的大小和预测 - Market Research

Intellect<https://www.marketresearchintellect.com/zh/product/high-purity-isotopic-copper-powder-market/>

[4] Copper isotopes – BuyIsotope

<https://www.buyisotope.com/copper-isotopes.php>

[5] 宁波江丰电子材料股份有限公司<https://www.kfmic.com/>

[6] 高纯铜 - 全国标准信息公共服务平台

[https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D7DF3DD3A7E05397BE0A0AB8](https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D7DF3DD3A7E05397BE0A0AB82A)

2A

[7] 同位素铜检测结果

[https://static-recommend-img.tiangong.cn/prod/analysis/2025-07-24/958638/19480589326](https://static-recommend-img.tiangong.cn/prod/analysis/2025-07-24/958638/1948058932670304256_b7056698de3511d8e3f57499c79a3868.png)

70304256_b7056698de3511d8e3f57499c79a3868.png

[8] 检测结果差异原因

[https://static-recommend-img.tiangong.cn/prod/analysis/2025-07-24/958638/19480590211](https://static-recommend-img.tiangong.cn/prod/analysis/2025-07-24/958638/1948059021153849344_37eb18a55e206eaf8aab23cd943f21e4.png)

53849344_37eb18a55e206eaf8aab23cd943f21e4.png

[9] Copper isotopes – BuyIsotope

<https://www.buyisotope.com/copper-isotopes.php>

[10] 探讨同位素铜在航空航天领域中的应用_同位素铜

<https://www.sanjiaoyi.com/?m=home&c=View&a=index&aid=122>

[11] 助力提升良率·赛默飞半导体行业综合解决方案

<https://www.thermofisher.cn/cn/zh/home/industrial/manufacturing-processing/manufacturing-processing-learning-center/electronics-information/semiconductor-analysis-imaging-metrology-information/semiconductor.html>

[12] [PDF] 附件1 《北京市重点新材料首批次应用示范指导目录(2021 年版)》

<https://jxj.beijing.gov.cn/jxdt/tzgg/202204/P020220819578889706557.pdf>

[13] Isotope Copper in Quantum Computing - Fayafi Investment Holding

<https://fayafi.ch/quantum-computing>

[14] High Purity Copper Sputtering Target Materials for Semiconductor ...

<https://www.verifiedmarketreports.com/product/high-purity-copper-sputtering-target-materials-for-semiconductor-market/>

[15] Role of Isotope Copper | Fayafi Investment Holding

<https://fayafi.ch/role-of-isotope-copper>

[16] [PDF] Corporate Overview - ASP Isotopes

<https://aspisotopes.com/wp-content/uploads/2022/10/Company-Presentation.pdf>