

К. ф.-м. н. Н. Н. ГРИГОРЬЕВ, М. Ю. КРАВЕЦКИЙ,
к. ф.-м. н. Г. А. ПАЩЕНКО, к. ф.-м. н. С. А. СЫПКО,
к. ф.-м. н. А. В. ФОМИН

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева
E-mail: tenet@alfa.semicond.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
10.01 2003 г.

Оппонент И. Р. ЗАВЕРБНЫЙ
(«Пролог-Семикор», г. Киев)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БЕСКОНТАКТНОГО ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДЛОЖЕК ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Получены аналитические выражения для формы поверхности обрабатываемой пластины, а также скорости съема материала, определяющей производительность процесса обработки.

Традиционная технология передела полупроводниковых слитков с целью получения подложек для эпитаксии и приборных заготовок предусматривает в операциях резки и шлифовки использование абразивных методов формообразования. Последующее тонкое абразивное полирование поверхности пластин применяется с целью получения поверхностей с требуемыми геометрическими параметрами (плоскостность, «завалы» по краям, шероховатость) [1]. Общим недостатком методов абразивного формообразования является то, что в процессе изготовления пластин в результате контакта с зернами в образце возникают структурные изменения. В объеме материала генерируются неравновесные комплексы точечных дефектов, на поверхности пластин появляется нарушенный слой, который для пластичных и дорогих полупроводников A^2B^6 , A^3B^5 может достигать значительной толщины (до 200 мкм) [1, с. 13; 2, с. 86]. Введенные структурные нарушения изменяют электрофизические свойства полупроводника, приводят к деградации его параметров. Поэтому в чистом виде методы абразивной обработки в производстве пластин не могут использоваться; их, по необходимости, дополняют методами химического травления изготовленных образцов для полного удаления нарушенного слоя и получения поверхностей с необходимыми геометрическими параметрами.

Нами разработана технология и оборудование для операций передела слитков, при использовании которых отсутствует прямое механическое взаимодействие инструмента с обрабатываемым образцом. Технология базируется на использовании химико-механических безабразивных бесконтактных методов формоизменения и включает в себя операции вырезания шайб из монокристаллических слитков (химическая резка) и полирования шайб (бесконтактная химико-механическая полировка) до необходимой геометрии поверхности без изменения (на всех этапах обработки) структурного совершенства и физических свойств материала.

Принципиальной особенностью технологии является то, что во всех операциях изготовления изделия в зону обработки полупроводника инструмент подает дозированное количество химически активной жидкости, которая растворяет обрабатываемый материал с последующим полным удалением продуктов реакции из зоны обработки. Резка и полирование проводятся без контакта изделия с инструментом в тонком, контролируемой толщины, слое травителя, поэтому изготовленный образец не содержит дополнительных структурных нарушений; повышается точность операций. Это позволяет существенно уменьшить припуск на обработку, экономить материал, в несколько раз увеличить выход годных и уменьшить затраты рабочего времени. Благодаря указанным преимуществам возможно также изготовление тонких (от десятков микрон) пластин пластичных полупроводников без остаточного изгиба и наклепа.

Целью работы являлось выяснение закономерностей формообразования и механизмов физических процессов, имеющих место при операциях бесконтактной безабразивной химической резки слитков и полирования полупроводниковых пластин, а также модельное описание этих процессов. Последнее позволило получить аналитические выражения для формы поверхности обрабатываемой пластины, что особенно актуально при полировании, а также скорости съема материала, определяющей производительность процесса обработки.

Сущность процесса *химической резки* (ХР) заключается в том, что растворяющий (режущий) химический раствор доставляется к разрезаемому образцу с помощью рабочего инструмента — движущейся струны из инертного материала, на которую налипают травитель. При контакте подносимого травителя с образцом между ними происходит химическое взаимодействие, результатом которого является образование полости в образце. Продукты реакции, образуемые в зоне резания, выносятся из нее тем же движущимся инструментом-носителем. При согласовании процессов доставки травителя в зону обработки и выноса продуктов реакции из нее процесс становится воспроизводимым. Следящая система в применяемом оборудовании обеспечивает автоматическую подачу образца на струну со скоростью подачи, равной скорости разрезания образца [3].

При *бесконтактном химико-механическом полировании* (БХМП) образец помещается в кассету [4], которая обеспечивает возможность его свободного движения в вертикальном направлении и ограничивает доступ травителя к боковой грани образца. В процессе полирования кассета устанавливается на инертный плос-

кий полировальник на расстоянии от центра вращения полировальника, намного превышающем линейные размеры образца. На поверхности полировальника равномерным слоем налит раствор травителя, уровень которого в процессе обработки поддерживается постоянным.

В настоящей работе мы исследуем режим полирования, когда горизонтальные перемещения образца отсутствуют, т. е. кассета остается неподвижной на вращающемся полировальнике.

Отсутствие контакта между материалом и инструментом (струной при ХР и полировальником при полировании) и поддержание постоянного жидкостного зазора, заполненного травителем, обеспечивается флотационной силой [5, с. 119], возникающей при движении инструмента. Ширина зазора, который образуется при БХМП, составляет около 10 мкм, при ХР — порядка нескольких микрометров.

В применяемом оборудовании для химической резки струна (обычно металлическая проволока), переносящая травитель, имеет диаметр 100—200 мкм. Поскольку ширина жидкостного зазора при ХР намного (почти на два порядка) меньше диаметра струны, это позволяет считать поверхность струны плоской.

Таким образом, в первом приближении процессы химического формообразования, происходящие при операциях ХР и БХМП, можно описать в рамках планарной модели конвективно-диффузионного массопереноса.

Для модельного описания процессов, происходящих при заданных условиях бесконтактного химического формообразования образцов, представим жесткий инструмент в виде бесконечной плоскости, движущейся поступательно с постоянной скоростью под поверхностью образца конечной длины. На инструмент равномерным слоем налита травильная жидкость с растворенным в нем активным компонентом. Жидкость вносится инструментом под поверхность образца; в результате образец и инструмент разделяются зазором, полностью заполненным травителем. Вещество инструмента является инертным по отношению к выбранной травящей жидкости, травление образца осуществляется благодаря взаимодействию между активным компонентом травителя и веществом образца.

Процесс бесконтактного химико-механического формообразования протекает в тонком (порядка нескольких микрометров) промежутке "образец — инструмент", в условиях прямолинейного движения жидкости и малых ($\ll 1$) чисел Рейнольдса. Точное решение уравнения движения Навье-Стокса для установившегося ламинарного течения для такого случая дает практически линейное распределение скоростей линий тока по сечению промежутка.

С целью упрощения задачи поток травителя можно разделить на два неподвижных слоя: один слой прилипает к полировальнику и движется с ним, другой прилипает к поверхности образца. Предполагается, что оба слоя на общей границе скользят друг относительно друга без трения и не перемешиваются. Слой травителя, движущийся вместе с инструментом, будем называть конвективным; неподвижный

слой, прилипший к образцу, — диффузионным слоем. Ширина зазора в конечной точке образца удерживается постоянной и не изменяется в процессе травления, что является существенной особенностью процесса полирования в нашем эксперименте.

Активный компонент травителя из конвективного слоя диффундирует в поперечном направлении к диффузионному слою жидкости; затем происходит диффузия реагента через неподвижный слой к поверхности образца и, далее, химическое взаимодействие с материалом образца. В результате химической реакции форма поверхности образца изменяется.

В начальный момент травления расстояние между инструментом и поверхностью образца установлено одинаковым по всей длине образца. Активный компонент раствора расходуется на травление образца, и это приводит к тому, что ее концентрация вдоль образца уменьшается. В результате начальные участки образца травятся быстрее, и расстояние между плоскостью инструмента и образцом вдоль образца начинает изменяться. Зазор в начале образца становится больше, чем в конце, где это расстояние, как отмечено ранее, остается постоянным.

Предполагается, что толщина движущегося (конвективного) слоя постоянна по всей длине образца. Поэтому более быстрое травление в начале образца приводит к увеличению толщины диффузионного слоя на входном участке образца. Увеличение толщины диффузионного слоя затрудняет доставку активного компонента травителя к поверхности образца, что приводит к уменьшению темпа травления в начале образца. В результате, по сравнению с предыдущим моментом времени, концентрация активного компонента увеличивается на всех участках зазора. Поскольку величина зазора в конечной точке образца фиксирована, это приводит к увеличению темпа травления по длине образца. Убывание скорости травления в начальных участках образца и ее увеличение вдоль образца будут продолжаться до тех пор, пока эти скорости не станут одинаковыми. Начиная с этого момента процесс обработки становится стационарным и устанавливается определенный профиль поверхности. В таком стабильном состоянии любое увеличение отстояния точек профиля от плоскости инструмента (конечная точка фиксирована), например, начальной, приводит в этом месте к уменьшению скорости растворения, и остальные точки профиля травятся быстрее; тем самым восстанавливается постоянная скорость травления по всей поверхности образца.

Итак, инструмент движется с постоянной линейной скоростью u под первоначально плоской поверхностью образца бесконечной ширины, длиной l . Направим ось Y перпендикулярно плоскости инструмента так, чтобы она проходила в начале образца вдоль его боковой стенки. Ось X находится в плоскости инструмента и направлена вдоль длины образца. Точка $x=0$ соответствует началу образца и здесь пересекается с осью Y ; в конце образца в точке $x=l$ между ним и инструментом удерживается постоянный зазор величиной 2δ . Предполагается, что в этой

точке ширина диффузионного слоя минимальна и равна ширине конвективного слоя, т. е. диффузионный слой наполовину заполняет зазор. В модели полагаем, что боковая поверхность в начале образца закрыта перегородкой, не проницаемой для травителя; основание перегородки параллельно плоскости инструмента и постоянно находится на расстоянии 2δ от него.

Для нахождения формы поверхности обрабатываемого образца и скорости процесса формоизменения, определяемых величиной плотности стационарного потока реагента к поверхности образца, решалось стационарное уравнение конвективной диффузии, которое для рассматриваемого вида слоистого течения имеет вид:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad 0 < y < y_0 \text{ (диффузионная область);}$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = 0, \quad y \geq y_0 \text{ (конвективная область),}$$

с граничными условиями:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{x,\delta} = -\frac{j_s}{D}, \quad \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{x,0} = 0; \quad c(0, 0 < y < \delta); \quad y_s(l) = 2\delta.$$

Здесь D — коэффициент диффузии активного компонента травителя;

j_s — плотность диффузионного потока на границе между диффузионным и конвективным слоями;

y_s — координаты точек поверхности образца.

Для указанной краевой задачи нами получено аналитическое выражение формы поверхности обрабатываемого образца:

$$y_s = 2\delta + \frac{D}{u\delta}(l-x) + \frac{2\delta}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D}{u\delta^2} x\right) - \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D}{u\delta^2} l\right) \right]. \quad (1)$$

Поскольку слагаемые с $n > 1$ вносят незначительный вклад в сумму, формулу (1) можно представить в виде

$$y_s = A - Bx + Ce^{-kx}, \quad (2)$$

где $A = 2\delta + \frac{D}{u\delta}l - \frac{2\delta}{\pi^2} e^{-\frac{D\pi^2}{u\delta^2}l};$

$$B = \frac{D}{u\sigma}; \quad C = \frac{2\sigma}{\pi^2}; \quad k = \frac{D\pi^2}{u\sigma^2}.$$

Для скорости V съема слоя поверхности образца получено:

$$\frac{1}{V} = \frac{\rho}{\alpha\beta c_0} + \frac{\rho l}{u\delta\beta c_0} + \frac{\rho\delta}{D\beta c_0} \left[\frac{4}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D}{u\delta^2} l\right) \right], \quad (3)$$

где ρ — плотность обрабатываемого материала;
 α — константа скорости химической реакции;

β — отношение массы растворяемого в процессе резки или полировки материала к массе расходуемого на его растворение активного компонента травителя.

Учитывая, что добавка

$$\Delta = \frac{\rho\delta}{D\beta c_0} \left[\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 D}{u\delta^2} l\right) \right]$$

в диффузионном члене может изменяться от 0 до $1/3 \frac{\rho}{\alpha\beta c_0}$, уравнение (3) упрощается:

$$\frac{1}{V} = \frac{\rho l}{u\delta\beta c_0} + \frac{\rho\delta}{D\beta c_0} + \frac{\rho}{\alpha\beta c_0}. \quad (4)$$

Формула (2) имеет особое значение для операции БХМП, поскольку позволяет определить или, изменяя параметры, задать макро рельеф поверхности образца. Согласно формуле, поверхность образца представляет собой плоскость с краевым завалом в начале образца; при этом коэффициент B определяет отклонение плоского участка от параллельности, а k — протяженность краевого завала. Характерно, что стационарная форма поверхности не зависит от природы материала, константы химической реакции, концентрации активного компонента травителя. Макро рельеф поверхности обработанного образца зависит только от коэффициента диффузии активного компонента, скорости движения травителя и ширины зазора. Изменяя скорость движения инструмента, величину зазора (зависящую от вязкости травителя), можно в процессе обработки регулировать отклонение от плоскостности и величину краевого завала поверхности образца.

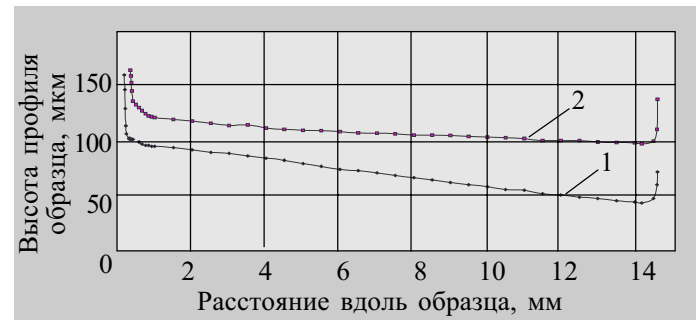


Рис. 1. Профили поверхности образцов после полирования в стационарном режиме при разных скоростях движения полировальника:
 1 — $U=5$ см/с; 2 — $U=12$ см/с

На рис. 1 приведены экспериментальные профилограммы поверхности образцов InSb, полученных в условиях стационарности операции БХМП. Из рисунка видно, что профилограммы поверхности образцов, как и следует из результатов модели, имеют протяженный прямолинейный участок с наклоном к горизонтальной плоскости и краевой завал, подчиняющийся экспоненциальному закону. С увеличением скорости u от 5 см/с (кривая 1) до 12 см/с (кривая 2) наклон линейного участка уменьшается, протяженность краевого завала увеличивается. Величины коэффициентов B и k , измеренные по экспериментальным профилограммам, показали хорошее совпадение со значениями, рассчитанными по формуле (2).

Формула (4) позволяет оценить производительность процесса бесконтактного химического формообразования. Это особенно важно для химической резки, поскольку позволяет определить максимальную скорость процесса, выявить пути совершенствования оборудования. По своей структуре формула (4) является суммой обратных предельных скоростей стадий процесса растворения: конвективной (первое слагаемое), диффузионной (второе слагаемое) и химической (третье слагаемое). Особый интерес представляет случай, когда скорости конвективной и диффузионной стадий (соответственно первое и второе слагаемые в правой части формулы (4)) равны друг другу. Для этого должно соблюдаться равенство

$$\delta = \left(\frac{Dl}{u} \right)^{1/2} \quad (5)$$

При постоянстве всех прочих (кроме δ) параметров, входящих в формулу (4), равенство (5) является также условием достижения максимума скорости съема V . Действительно, подставляя равенство (5) в формулу (4), получаем следующую зависимость максимальной (по δ) скорости съема V_{\max} от параметров процесса:

$$\frac{1}{V_{\max}} = \frac{2\rho}{\beta c_0} \left(\frac{l}{uD} \right)^{1/2} + \frac{\rho}{\alpha \beta c_0} \quad (6)$$

Формула (6) может быть использована для оценки скорости химической резки. Для операции ХР подбираются травители с максимально высокой скоростью химической стадии реакции, т. е. с большими значениями α . Поэтому скорость растворения в случае химической резки обычно контролируется диффузией, благодаря чему вторым слагаемым в правой части формулы (6) в данном случае можно пренебречь.

Далее, поскольку в устройствах для химической резки поверхность инструмента не является плоской, процесс растворения материала вблизи инструмента протекает в разных точках с разной скоростью, причем максимальная скорость растворения достигается там, где выполняется условие (5). В результате профиль дна пропила принимает W-образный вид с максимальным подъемом под струной. Если при этом струна прижимается к образцу с некоторым усилием и, следовательно, имеет некоторый прогиб, ее положение в горизонтальной плоскости становится неустойчивым. Стремясь уменьшить величину прогиба, она смещается влево или вправо от возвышения в середине пропила. Далее W-образный профиль воспроизводится в другом месте, и струна снова смещается в ту или другую сторону.

Таким образом, при разрезании образца методом ХР инструмент углубляется в разрезаемый материал со скоростью V_{\max} не по прямой, а по ломаной линии, причем ее прямые участки имеют наклон относительно направления подачи. Учитывая вышесказанное, модифицируя уравнение (6), можно получить следующее выражение для скорости химической резки $V_{\text{ХР}}$:

$$\frac{1}{V_{\text{ХР}}} = \frac{2\rho}{\beta c_0} \left[1 + \frac{2(Dl/u)^{1/2}}{R} \right] \left(\frac{l}{uD} \right)^{1/2} = \frac{2\rho}{\beta c_0} \left(\frac{l}{uD} \right)^{1/2} + \frac{4\rho l}{\beta c_0 R u}, \quad (7)$$

где R — радиус сечения инструмента.

Нами были проведены экспериментальные исследования зависимости скорости химической резки образцов HgCdTe от длины образца l и скорости движения струны u . В качестве травителя использовался 20%-ный раствор брома в бромисто-водородной кислоте. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, экспериментальная зависимость обратной скорости резки от длины образца близка к степенной с показателем степени, несколько большим, чем 1/2. Последнее может объясняться влиянием второго слагаемого формулы (7).

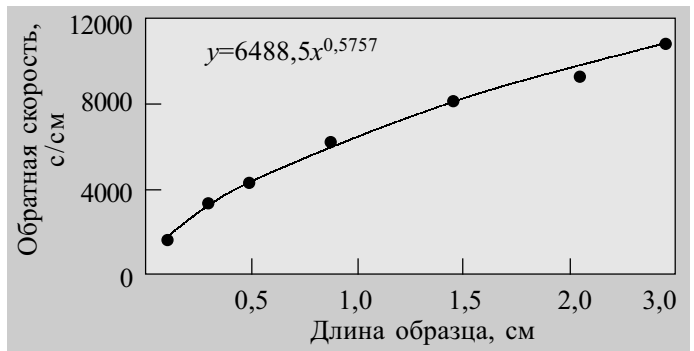


Рис. 2. Зависимость обратной скорости химической резки образцов HgCdTe от длины образца

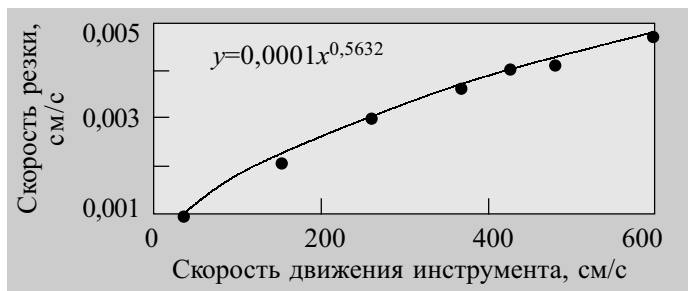


Рис. 3. Зависимость скорости химической резки образцов HgCdTe от скорости движения инструмента

Экспериментальная зависимость скорости резки от скорости движения инструмента представлена на рис. 3. Подобно зависимости обратной скорости резки от длины образца, эта зависимость также близка к степенной и с почти таким же показателем степени.

Полученные зависимости выявляют потенциально большие резервы повышения скорости ХР. Например, при скорости движения струны $u=18$ см/с слиток HgCdTe диаметром 10 мм разрезается на применяемом станке СХР-2 за один час. Из наших расчетов следует, что при увеличении скорости движения струны до 20 м/с (даже при диаметре разрезаемого слитка ~60 мм) продолжительность разрезания составит всего около полутора часов. Таким образом, соответствующая техническая доработка оборудования, связанная, в основном, с увеличением скорости перемещения носителя травильной жидкости, позволит методу химической резки стать конкурентоспособным в сравнении с абразивными методами в технологических линиях передела монокристаллических слитков.

Выводы

1. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей показало их качественное и хорошее количественное согласование. Это позволяет использовать результаты работы при разработке травящих растворов и выборе оптимальных технологических режимов операций бесконтактного безабразивного передела слитков для получения полупроводниковых подложек.

2. Стационарный профиль поверхности, образующийся после операции бесконтактного химико-механического полирования, не зависит от величин, характеризующих свойства вещества образца, концентрации травителя и константы скорости химической реакции. Профиль образованной поверхности зависит только от скорости движения инструмента, ширины зазора и коэффициента диффузии активного компонента травителя. Напротив, скорость съема материала существенно зависит от свойств травящего

раствора и свойств вещества обрабатываемого образца.

3. Полученные экспериментальные и теоретические зависимости выявляют потенциально большие резервы повышения скорости химической резки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Перевошиков В. А., Скупов В. Д. Особенности химической обработки поверхности полупроводников.— Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 1992.
2. Карбань В. И., Борзаков Ю. И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике.— М.: Радио и связь, 1988.
3. А. с. СССР 1626575. Способ химической резки полупроводниковых кристаллов / А. В. Фомин, М. Ю. Кравецкий, Е. А. Сальков.— 08.10.91.
4. А. с. СССР 1792060. Кассета для обработки плоских поверхностей деталей / П. Ф. Венгель, О. О. Панчук, А. С. Фомин.— 01.10.92.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1974.

Д. т. н. В. А. СОКОЛ, к. т. н. Е. П. ИГНАШЕВ

Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, г. Минск
E-mail: vasokol@gw.bsuir.unibel.by

Дата поступления в редакцию
05.07 2002 г. — 16.01 2003 г.

Оппонент *д. х. н. В. Д. ОРЛОВ*
(Харьковский нац. ун-т им. В. Н. Каразина)

УСТАНОВКА ТОЛСТОСЛОЙНОГО АНОДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

Приведены основные конструктивные данные и особенности разработанной установки динамического толстослойного анодирования алюминия для изделий радиоэлектроники.

Изготовление алюминиевых оснований для гибридных интегральных микросхем и других изделий радиоэлектронной техники производится электрохимическим анодированием алюминия или его сплавов [1, 2]. Процесс осуществляется в ячейке или в ванне, заполненной электролитом, в которой один из двух электродов (анод) и есть будущая подложка. При пропускании электрического тока на поверхности алюминиевой пластины образуется оксид за счет ассимиляции кислорода, количество которого есть функция тока и времени.

Выделяемое в процессе анодирования тепло отрицательно влияет на качество и толщину получаемой пленки оксида. Повышение температуры анода усиливает травящую способность электролита, что приводит к подтравливанию и разрыхлению оксида, ухудшению его механических и диэлектрических свойств. Чтобы снизить это влияние и избежать местного перегрева, предпринимают меры к перемешиванию и циркуляции электролита [3, 4]. Однако создать необходимые для этого скорости потока электролита около анода известными способами (барботирование, циркуляция, инжестирование и пр.) и достичь высокого уровня отвода тепла от него не удается.

Задача состояла в том, чтобы повысить эффективность отвода тепла от анода. С этой целью перешли от анодирования в статике к анодированию в динамике.

На этом принципе разработана и создана установка толстослойного анодирования А-1, принципиальная схема которой без источника питания представлена на рисунке [5]. Анодируемые пластины находятся здесь в постоянном движении в течение всего процесса анодирования. Линейную скорость движения пластин можно регулировать в пределах 5 — 50 м/мин.

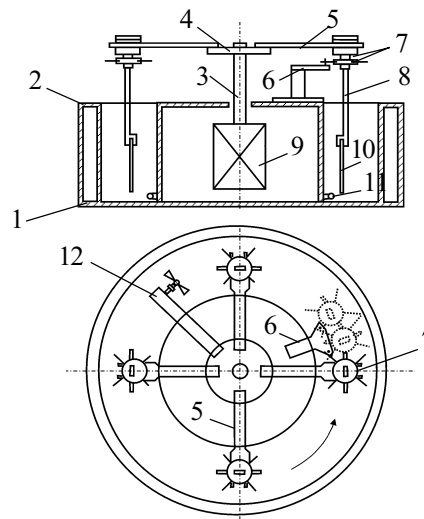


Схема установки анодирования:

- 1 — ванна; 2 — охлаждающая рубашка; 3 — вал; 4 — карусель; 5 — коромысло; 6 — консоль с упорами; 7 — поворотный узел; 8 — пластинодержатель; 9 — электродвигатель; 10 — анодируемая пластина; 11 — тэн; 12 — мешалка