

Л. Б. ДЖАНГИДЗЕ, к. ф.-м. н. А. Н. ТАВХЕЛИДЗЕ,  
Ю. М. БЛАГИДЗЕ, З. И. ТАЛИАШВИЛИ

Грузия, Тбилисский государственный университет  
E-mail: avtotav@geo.net.ge

Дата поступления в редакцию  
18.09 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ КОНФОРМНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА С ВАКУУМНЫМ НАНОЗАБОРОМ

*Предложены различные технологические приемы, позволяющие получить правильную геометрию электрода в процессе электроосаждения меди и уменьшить внутреннее напряжение осаждаемого слоя.*

В последние годы проводятся работы по созданию микрохолодильников на основе квантовомеханического туннелирования электронов. Первое теоретическое исследование охлаждения с помощью туннелирования проводилось для предотвращения перегрева одноэлектронных транзисторов [1]. Типичный туннельный переход «металл—изолятор—металл» имеет высокую удельную теплопроводность вследствие низкой толщины изолятора (3—10 нм). Это приводит к появлению паразитного обратного теплового потока, который уменьшает коэффициент охлаждения.

Туннельный переход «металл—вакуум—металл» лишен этого недостатка, однако он очень сложен с точки зрения практической реализации. В [2] предложен метод получения такого перехода электрохимическим осаждением конформных электродов, при котором образуется вакуумный нанозазор большой площади.

Характеристики холодильников с вакуумным нанозазором изучались теоретически в ряде работ [3—7]. Было показано, что охлаждающая способность перехода «металл—вакуум—металл» составляет примерно 100 Вт/см<sup>2</sup> [3, 5], однако коэффициент охлаждения таких переходов не превышает 10%. В [6] изучали туннельный переход «металл—вакуум—изолятор—металл» с дополнительным тонким слоем изолятора на коллекторе. Коэффициент охлаждения такого перехода оказался значительно выше, порядка 40—50%, а изоляционный слой предохраняет электроды от короткого замыкания и упрощает их конструкцию. В [8] определена возможность практической реализации конформных электродов электроосаждением меди.

### Методы реализации и экспериментальные результаты

В качестве базовых электродов при электролизе были использованы полированные подложки Si(100) *n*-типа диаметром 50, 40 и 20 мм и толщиной 1—

2 мм. На кремниевые пластины осаждались в вакууме тонкие пленки Ti и Ag (Ti—0,1 мкм и Ag—1,2 мкм) со средней адгезией между ними, которая точно регулировалась [9]. Затем при нормальных условиях проводили электроосаждение толстого слоя меди на поверхность серебра.

Толстые слои Cu осаждались в сульфатных электролитах (CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH+H<sub>2</sub>O) в термостабилизированной ванне с механическим перемешиванием электролита при плотности тока  $i=15—50$  мА/см<sup>2</sup>. Эти электролиты не сложны по своему составу, устойчивы, легко корректируются и позволяют использовать относительно высокие плотности тока, а выход по току близок к теоретическому значению—100%. Этиловый спирт в некоторой степени предотвращает образование одновалентных ионов меди, способствуя получению мелкокристаллического осадка.

Токовый вывод подсоединялся к Si-пластине с обратной стороны, которая была изолирована от электролита.

Электролиз проводили в температурном диапазоне 23,5—35°C. Стабилизация температуры позволяла не допустить преждевременного расщепления электродов из-за различия в коэффициентах термического расширения кремния пластины и осаждаемого слоя меди. Для этого использовали две ванны. Ванна с электролитом помещалась в ванну с водой. Температура воды поддерживалась нагревателем и была на два градуса меньше, чем температура электролита, которая варьировалась в диапазоне 23,5—35°C и стабилизировалась с точностью до 0,3°C. Исследовалась возможность получения осажденного слоя Cu с однородной поверхностью для создания металлического электрода нужного диаметра и формы. Для обеспечения равномерного распределения Cu по поверхности катода использовались следующие методы:

- защита поверхности катода кольцевыми масками разной формы из электроизоляционного материала;
- установка дополнительных катодов около основного катода;
- вращение катода;
- использование анодов различных размеров;
- использование асимметричного переменного тока.

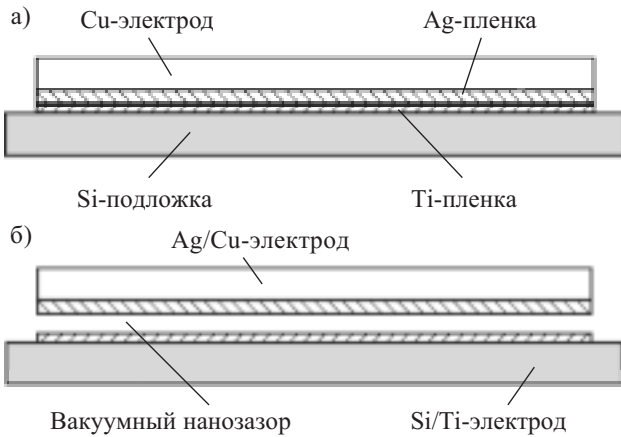


Рис. 1. Многослойный сэндвич Si/Ti/Ag/Cu (а) и конформные электроды, полученные после расщепления сэндвича (б)

На Si-пластинах диаметром 50 и 40 мм осаждался медный электрод диаметром 28 мм. На пластинах диаметром 20 мм выращивались электроды диаметром 12 и 3 мм. Толщина слоя меди составляла 450—750 мкм для электродов диаметром 28 и 12 мм и до 4000 мкм для электрода диаметром 3 мм.

В результате получали «сэндвич» Si/Ti/Ag/Cu (рис. 1, а), который при нагреве или охлаждении разделяется на объемные электроды Si/Ti и Ag/Cu (рис. 1, б) [2] из-за различия коэффициентов термического расширения Si и Cu. Конформность поверхности электродов, сформировавшихся после расщепления (т. е. величину общего изгиба), определяли оптическим методом с помощью интерферометра Майкельсона [10]. На электроде Ag/Cu изгиб определяли со стороны Ag.

В качестве источника излучения служил He-Ne лазер с длиной волны  $\lambda=632,8$  нм. Одно из зеркал интерферометра заменяли зеркальной поверхностью

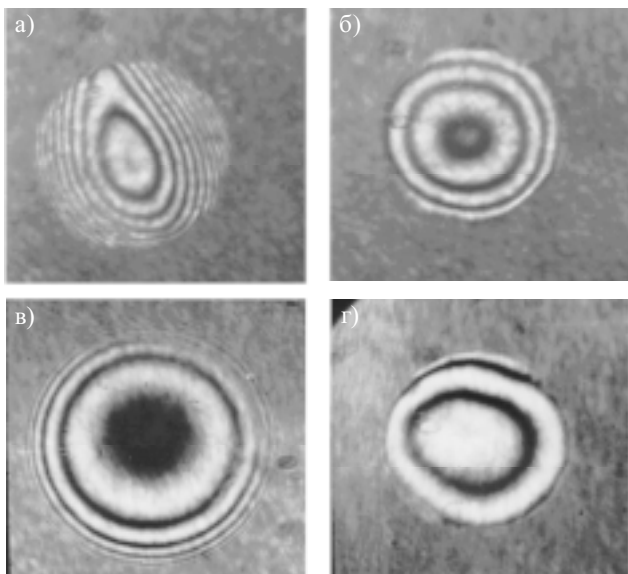


Рис. 2. Интерферограммы поверхности Ag/Cu-электрода (со стороны Ag) (а, б, в) и Si/Ti-электрода (г) после вскрытия сэндвичей, полученных при 35°C: а — без вращения катода; б, в — с вращением катода

электрода Ag/Cu. Интерференционная картина формировалась в воздушном зазоре между одним из зеркал и виртуальным изображением второго зеркала (в нашем случае — образца). Когда зазор был параллельным, получали полосы одинакового наклона (кольца) (рис. 2). После закрепления образца в соответствующем листе интерферометра положение образца регулировали для получения интерференционной картины с наклонными полосами. Подсчитав число колец  $n$ , можно вычислить общий изгиб образца по формуле  $N=n\lambda/2$ . Знак изгиба определялся при легком нажатии на зеркало, находящееся в большом плече интерферометра. Уменьшение количества колец на интерференционной картине означает выпуклость поверхности и, соответственно, увеличение количества колец свидетельствует о ее вогнутости. Для определения приведенного изгиба  $\alpha$  металлического электрода использовали формулу  $\alpha = \frac{n\lambda}{2D}$ .

Начальный приведенный изгиб для базового электрода (Si-пластины) с  $D=50, 40$  и  $20$  мм составлял 57, 47 и 16 нм/мм, соответственно. Во время измерений изгиба с помощью интерферометра температуру поддерживали равной температуре осаждения медного электрода.

В первых экспериментах медная поверхность была неровной, с выступающими краями (рис. 3, а). Толщина меди на краях электрода примерно в два раза превышала толщину в его средней части. Расчеты позволяют определить только среднюю толщину поверхности. Экспериментальные данные в [11] показали, что даже на плоских электродах, помещенных на равном расстоянии от анода, плотность тока, а следовательно и толщина покрытия распределяются неравномерно. Плотность тока в углах и по краям электрода значительно превышает расчетную, а в средней его части она ниже. Если два параллельных электрода одинаковой площади поместить в электролит, ток проходит не только вдоль основных силовых линий, перпендикулярных к поверхности электродов, но и вдоль дополнительных силовых линий. Если при поперечном сечении ванны площадь электролита больше, чем площадь электродов, силовые линии концентрируются, в основном, по краям электрода и могут огибать их в зависимости от геометрии электрода и ванны.

Для устранения краевых эффектов во время осаждения слоя меди толщиной 450—750 мкм на

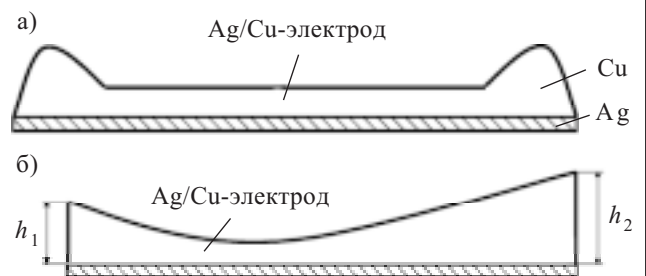


Рис. 3. Электрод Ag/Cu, осажденный без защитной маски (а) и с защитной маской высотой 3 мм (б)

электрод диаметром 28 мм использовали разные защитные маски высотой 3 мм. Медный слой электрода Ag/Cu имел вогнутую поверхность с разной толщиной по краям (рис. 3, б). Толщина медного слоя в нижней части электрода ( $h_2$ ) всегда была больше, чем в его верхней части ( $h_1$ ). Средняя разница составляла  $\Delta h_{\text{ср}}=105$  мкм. Поверхность электрода Ag/Cu со стороны Ag имела изгиб цилиндрической формы с  $\alpha=237$  нм/мм.

Для устранения изгиба электрода Ag/Cu диаметр кремниевой пластины уменьшили до 20 мм при неизменной ее толщине (1 мм), а диаметр осаждаемого электрода уменьшили до 12 мм. При этом высоту кольцевой защитной маски увеличили до 10 мм. Поверхность Cu сохранила такую же вогнутую форму с краями разной высоты, но значение  $\Delta h_{\text{ср}}$  уменьшилось до 41 мкм. Поверхность электрода со стороны Ag имела такую же цилиндрическую форму, значение приведенного изгиба составляло 178 нм/мм.

Известно, что при электроосаждении металла пленки осадков находятся в напряженном состоянии, и когда осаждение происходит только на одной стороне катода, эти силы напряжения приводят к его изгибу [12]. Чтобы уменьшить кривизну катода, увеличили толщину кремниевой пластины до 2 мм. В результате изгиб электрода уменьшился, и для осажденного медного электрода диаметром 12 мм приведенный изгиб составил 117 нм/мм.

При сравнении изгибов металлических электродов, осажденных на кремниевые пластины толщиной 1 и 2 мм, видно, что с увеличением толщины пластины до 2 мм изгиб электрода Ag/Cu уменьшается приблизительно в 1,5 раза.

Для уменьшения неровности электрода по краям рядом с основным катодом помещали дополнительные катоды. При формировании медного электрода диаметром 12 мм дополнительный кольцевой электрод помещался на внешнем диаметре защитной маски. Этот электрод отбирал часть тока и значительно снижал неравномерность осаждения Cu по краям. Плотность тока дополнительного катода составляла  $i=5$  мА/см<sup>2</sup>. Полученный в таких условиях слой меди был более равномерный ( $\Delta h_{\text{ср}}=9$  мкм, приведенный изгиб электрода, измеренный со стороны слоя Ag, равен 87 нм/мм).

Для дальнейшего уменьшения неравномерности слоя меди на электроде катод вращался, что обеспечивало перемешивание электролита. Это, в свою оче-

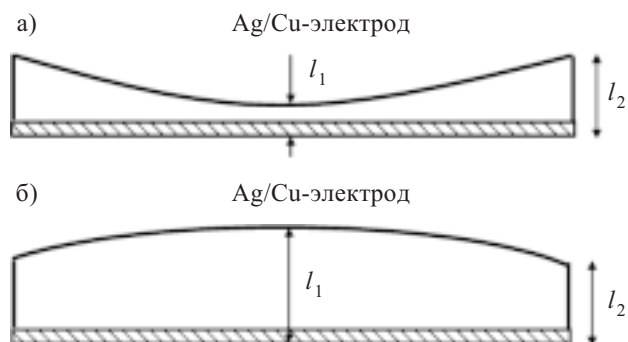


Рис. 4. Вогнутая (а) и выпуклая (б) поверхность меди электрода Ag/Cu, осажденного с конической маской при вращении катода

редь, позволяло получить медную поверхность с равномерными краями и центрально-симметричным изгибом металлического электрода (рис. 2, б) с необходимым знаком изгиба.

Кроме перечисленных способов использовали также конусообразные защитные маски высотой 5 и 10 мм с диаметрами отверстий 9/12, 10/12, 11/12, 12/12 мм. В зависимости от диаметра отверстия защитной маски и угловой скорости вращения катода  $V_{\phi}$  медная поверхность электрода Ag/Cu получалась либо вогнутой (рис. 4, а), либо выпуклой (рис. 4, б). В случае использования масок с диаметрами отверстий 9/12 и 10/12 мм медная поверхность была всегда выпуклой, независимо от угловой скорости вращения катода. При использовании масок с диаметрами отверстий 11/12 и 12/12 мм при  $V_{\phi}=2,5$  об/мин медная поверхность была, в основном, вогнутой, тогда как при  $V_{\phi}=10$  об/мин она была выпуклой. Значения  $\Delta h_{\text{ср}}$ ,  $\Delta l_{\text{ср}}$  (различие в толщине электрода между центром и краями) и  $\alpha_{\text{ср}}$  приведены в табл. 1. Как видно, минимальный приведенный изгиб получается при использовании маски с диаметрами отверстий 10/12 мм.

Помимо медных анодов стандартного размера (площадь анода в два раза больше площади катода), использовали плоские ( $D=10$  мм) и конусообразные ( $D=8$  мм) аноды. В случае  $V_{\phi}=0$  при использовании стандартной защитной маски высотой 10 мм получали  $\Delta h_{\text{ср}}=13$  мкм. В данном случае использование конусообразных масок и катодного вращения не приводило к значительным изменениям.

Для уменьшения изгиба поверхности использовали асимметричный переменный ток с разными амплиту-

Таблица 1

Характеристики медных электродов диаметром 12 мм, осажденных с конусообразными масками при вращении катода

Диаметр отверстий маски ( $d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$ )	$V_{\phi}=2,5$ об/мин			Форма поверхности меди	$V_{\phi}=10$ об/мин			Форма поверхности меди
	$\Delta h_{\text{ср}}$ , мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$ , мкм	$\alpha_{\text{ср}}$ , нм/мм		$\Delta h_{\text{ср}}$ , мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$ , мкм	$\alpha_{\text{ср}}$ , нм/мм	
9/12	10,5	115	132	выпуклая	12	149	126	выпуклая
10/12	3,7	45,5	110		5	89	84	
11/12	7,4	9,4	192	вогнутая	10,7	75	210	
12/12	4,1	46	232		5,9	39,5	195	

дами прямого и обратного токов. Согласно [13], 80—90% асимметричного переменного тока идет на наращивание слоя Cu, а остальной ток используется для анодного растворения поверхности, т. е. идет на сглаживание. В настоящей работе для дополнительного катода использовался асимметричный переменный ток с амплитудой 0,35—1,15 мА и асимметрией 40—90% на частоте 20, 30, 50 Гц. При  $V_{\phi}=0$  получали вогнутую поверхность Cu электрода с  $\Delta l_{cp}=36$  мкм и  $\alpha=132$  нм/мм.

Для осаждения толстых слоев Cu использовали асимметричный переменный ток с амплитудой 30—35 мА и защитную маску высотой 5 мм и диаметром отверстия 12 мм. В этом случае получена равномерная поверхность Cu с  $\Delta l_{cp}=8,4$  мкм, а значение приведенного изгиба составляло 158 нм/мм при  $V_{\phi}=10$  об/мин.

Как известно, увеличение температуры электролита ускоряет процесс осаждения толстого медного слоя, т. к. вызывает значительные изменения условий электролиза: увеличение растворимости солей и электропроводности электролита, уменьшение пассивности анода, улучшение условий диффузии ионов и уменьшение внутреннего напряжения осажденного слоя. Кроме того, этот слой становится более пластичным, что способствует лучшему сохранению знака изгиба и формы электродов после расщепления сэндвича. С другой стороны, при высокой температуре образуются осадки крупнокристаллической структуры, т. к. катодная поляризация уменьшается. Это может быть скомпенсировано увеличением плотности тока и перемешиванием электролита [14, 15].

Для исследования зависимости изгиба электрода диаметром 12 мм от температуры медь осаждали с конусообразной защитной маской высотой 10 мм и диаметром отверстия 10/12 мм. Скорость вращения катода составляла  $V_{\phi}=10$  об/мин, а плотность тока  $i=25—30$  мА/см<sup>2</sup>. При повышенной температуре (40—45°C) сэндвичи расщепляются в процессе электролиза, и поэтому эксперименты проводили в ограниченном температурном диапазоне 23,5—35°C.

На рис. 5 видно, что при увеличении температуры электролита кривизна электрода уменьшается примерно в три раза. На рис. 2 показаны интерферограммы электродов Si/Ti и Ag/Cu после вскрытия сэндвича, полученного при температуре 35°C.

На следующей стадии эксперимента диаметр электрода Cu уменьшали до 3 мм. Слой меди толщиной от 700 до 2300 мкм осаждали при вращении катода со скоростью 2,5 и 10 об/мин при плотности тока 15—20 мА/см<sup>2</sup>. Использовали режим как постоянного

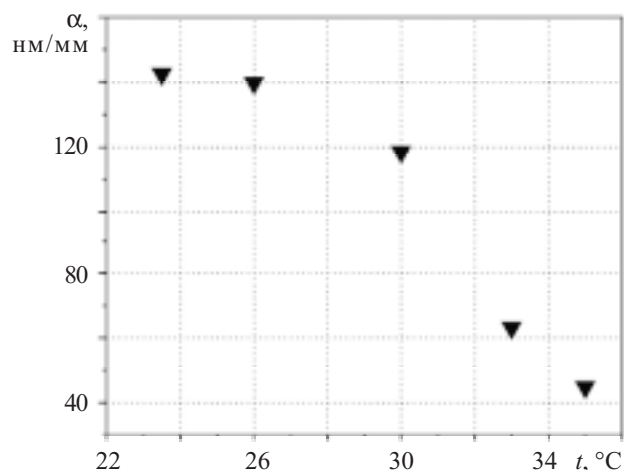


Рис. 5. Зависимость приведенного изгиба электрода Ag/Cu диаметром 12 мм от температуры электролита

(ПТ), так и асимметричного переменного тока (АПТ). Из полученных данных (табл. 2) видно, что при формировании металлического электрода Ag/Cu диаметром 3 мм наилучший результат, т. е. наименьшее значение  $\alpha$  ( $\alpha_{cp}=40$  нм/мм), получается при асимметричном переменном токе и скорости вращения катода 10 об/мин.

Был также выращен медный электрод диаметром 3 мм толщиной около 4000 мкм. В этом случае плотность асимметричного переменного тока увеличили до  $i=30—40$  мА/см<sup>2</sup> и осаждали медь при  $V_{\phi}=2,5$  об/мин с защитной маской высотой 5 мм. Исследования были проведены при крайних значениях температурного диапазона электролита — 23,5 и 35°C. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением температуры электролита приведенный изгиб электрода возрастает (при 23,5°C  $\alpha_{cp}$  меняется от значения менее 2,5 до 17,9 нм/мм, при 35°C — от 3,2 до 105,4 нм/мм). Это можно объяснить структурными различиями в осажденных слоях меди. Фактически, высокая температура и высокая плотность тока способствуют уменьшению времени роста слоя Cu толщиной до 4000 мкм. Из-за высокой скорости роста медные слои были плохого качества — ломкие и пористые, иногда с дендритами, что оказывало влияние на изгиб электрода Ag/Cu.

Из литературы известно [16], что при увеличении толщины осажденного слоя размер составляющих его зерен постепенно увеличивается и затем стабилизируется при определенной толщине. Это, в свою очередь, уменьшает величину внутреннего напряжения

Таблица 2

Характеристики электрода Ag/Cu диаметром 3 мм, осажденного при постоянном и переменном токе

Характер тока	$V_{\phi}=2,5$ об/мин				$V_{\phi}=10$ об/мин			
	$\Delta h_{cp}$ , мкм	$\Delta l_{cp}$ , мкм	$\alpha_{cp}$ , нм/мм	Форма поверхности меди	$\Delta h_{cp}$ , мкм	$\Delta l_{cp}$ , мкм	$\alpha_{cp}$ , нм/мм	Форма поверхности меди
Постоянный	—	—	—	—	3	6,7	74	выпуклая
Асимметричный переменный	18,5	13,9	53	вогнутая	11	7,3	40	

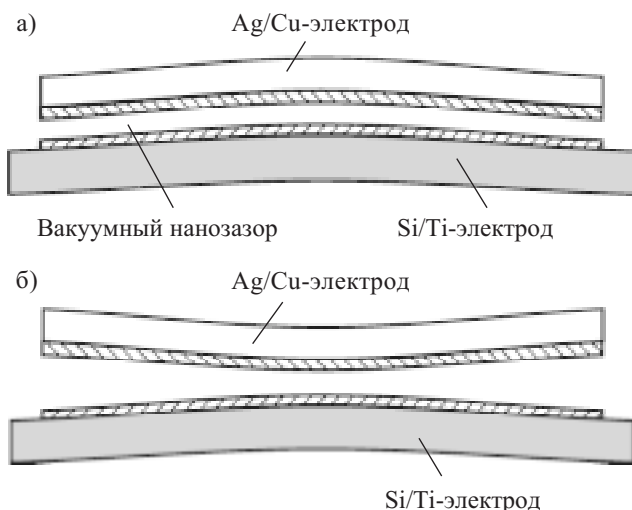


Рис. 6. Сэндвич после вскрытия:

а — электрод Si/Ti выпуклый, электрод Ag/Cu со стороны Ag вогнутый; б — оба электрода выпуклые

слоя осадка до некоторого постоянного значения. Кроме того, при дальнейшем увеличении толщины внутренние напряжения в медном слое постепенно уменьшаются в зависимости от режима электролиза [17]. Для получения толстого слоя меди электрода диаметром 3 мм, осажденного при 23,5°C, была выбрана максимальная плотность тока  $i=30-40$  мА/см<sup>2</sup>. Это давало возможность уменьшить изгиб до 2,5 нм/мм, а в некоторых случаях получить образцы без изгиба ( $\alpha_{ср} < 2,5$  нм/мм), т. е. максимально конформные электроды.

Исходные кремниевые подложки обрабатываются механической полировкой, поэтому имеют, в основном, выпуклую форму. В процессе роста слоя меди кремниевая пластина деформируется в том или ином направлении по отношению к исходному изгибу. После расщепления сэндвича Si-пластина восстанавливает свой первоначальный изгиб, а металлический электрод Ag/Cu может быть как вогнутым (рис. 6, а), так и выпуклым (рис. 6, б). Следовательно, основным условием обеспечения конформности поверхности двух электродов Si/Ti и Ag/Cu является получение вогнутой со стороны Ag поверхности Ag/Cu-электрода.

Форма поверхности такого электрода зависит от толщины кремниевой пластины и температуры электролита. При осаждении меди на пластины толщиной 1 мм доля электродов с вогнутой поверхностью составляла 22%, а на пластины толщиной 2 мм — до

Таблица 3

Доля вогнутых поверхностей в общем количестве электродов Ag/Cu диаметром 12 и 3 мм, полученных при различной температуре электролита

Диаметр электрода, мм	12					3		
	<i>t</i> , °C	23,5	26	30	33	35	23,5	35
Доля вогнутых поверхностей, %		54	24	26	80	82	100	85,7

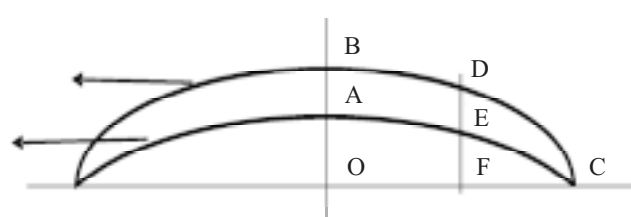


Рис. 7. Поперечное сечение сэндвича:

АЕС — поверхность электрода Si/Ti; BDC — поверхность электрода Ag/Cu

59%, т. е. увеличение толщины Si-пластины увеличивает долю вогнутых поверхностей примерно в 2,7 раз.

Соотношение вогнутых и выпуклых поверхностей электрода Ag/Cu диаметром 12 и 3 мм, осажденного на кремниевой пластине толщиной 2 мм, приведены в табл. 3. Видно, что наилучшие результаты для электрода Ag/Cu диаметром 12 мм были получены при температуре электролита 35°C, а для электрода диаметром 3 мм — при температуре 23,5°C.

Площадь контакта поверхностей конформных электродов, повторяющих друг друга (т. е. поверхность Si/Ti выпуклая, а поверхность Ag/Cu со стороны Ag — вогнутая), была рассчитана по простым правилам геометрии [10, 18]. Для этого рассматривали поперечное сечение сэндвича в плоскости, перпендикулярной его поверхности и пересекающей его центр (рис. 7). Область, где расстояние между электродами не превышает 50 Å, можно определить как поверхностный контакт. Площадь контакта — это площадь кольца, внешний радиус которого равен радиусу образца ОС, а внутренний равен OF. Заменяв дуги AC и BC с достаточной точностью на прямые линии, находим, что площадь контакта выражается формулой

$$S = \pi r^2 (\delta/H)(2 - \delta/H).$$

Здесь  $H$  — разница максимальных изгибов поверхностей,  $H=AB$ ;  $\delta$  — расстояние между электродами,  $\delta=DE$ .

Полученные значения площади контакта поверхностей электродов Si/Ti и Ag/Cu для некоторых образцов диаметром 3 мм приведены в табл. 4. Для вычислений использовали значение  $\delta=5$  нм, а  $H$  определяли из выражения  $H=n\lambda$  ( $n$  — число колец в интерферограмме,  $\lambda=3164$  Å).

Таблица 4

Площадь контакта поверхностей электродов Si/Ti и Ag/Cu диаметром 3 мм, осажденных при разной температуре электролита

$t=23,5^\circ\text{C}$		$t=35^\circ\text{C}$	
Общий изгиб	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Общий изгиб	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>
<0,025	6—7	1	0,2
<0,025	6—7	0,07	2,8
0,17	1,22	0,04	4,42
0,04	4,42	0,08	2,48
<0,025	6—7	0,33	0,65
0,025	6,05	0,03	5,4

Наилучшие результаты — у электродов Si/Ti и Ag/Cu, полученных в процессе осаждения меди при температуре электролита  $t=23,5^{\circ}\text{C}$ , причем для трех образцов вся площадь электродов является площадью контакта. Это означает, что вакуумный нанозазор имеет ширину менее 5 нм по всей площади электродов.

### Выводы

Таким образом, использование защитных масок в процессе обычного электроосаждения толстого слоя меди на электрод уменьшило разницу в толщине меди по краям электрода. Катодное вращение позволило получить центрально-симметричный изгиб электрода, а также изменить знак изгиба в нужном направлении. Увеличение толщины кремниевой пластины позволило уменьшить приведенный изгиб медного электрода и увеличить долю вогнутых электродов в общем количестве полученных на 37%. В то же время, с увеличением температуры электролита приведенный изгиб уменьшается, а количество электродов с вогнутой поверхностью увеличивается на 28%.

Уменьшая диаметр электрода Ag/Cu до 3 мкм и используя асимметричный переменный ток, приведенный изгиб металлического электрода можно уменьшить до 2,5 нм/мм. При температуре электролита  $23,5^{\circ}\text{C}$  все поверхности полученных образцов были вогнутые, причем, были получены образцы и без явных признаков изгиба. Расчет площади контакта поверхностей на основе экспериментальных значений изгиба показал, что нанозазор между электродами не превышает 5 нм по всей поверхности электродов диаметром 3 мкм.

Конформные поверхности, полученные электроосаждением, можно использовать в качестве электродов в термотуннельных холодильниках с вакуумным нанозазором и в генераторах мощности.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Korotkov A. N., Samuelsen M. R., Vasenko S. A. Effects of overheating in a single-electron transistor // *J. Appl. Phys.*— 1994.— Vol. 76 (6).— P. 3623—3631.
2. Tavkheldze A., Skhiladze G., Bibilashvili A. et al. Electron tunneling through large area vacuum gap — preliminary results //

*Proc. XXI International Conf. on Thermoelectric.*— 2002.— IEEE.— New York.— P. 435—438.

3. Hishinuma Y., Geballe T. H., Moyzhes B. Y., Kenny T. W. Refrigeration by combined tunneling and thermionic emission in vacuum: Use of nanometer scale design. // *Appl. Phys. Lett.*— 2001.— Vol. 78.— P. 2572.

4. Zeng T. Thermionic-tunneling multilayer nanostructures for power generation // *Appl. Phys. Lett.*— 2006.— Vol. 88.— P. 153104.

5. Zhang Xin, Zhang Dian-Lin. Tunnelling cooling by a normal-vacuum-superconductor junction // *Chinese Phys.*— 2007.— Vol. 16.— P. 2656—2660.

6. Tavkheldze A., Svanidze V., Tsakadze L. Thermotunnel refrigerator with vacuum/insulator tunnel barrier: A theoretical analysis // *J. Vac. Sci. Technol. A.*— 2008.— Vol. 26(1).— P. 5—7.

7. Hishinuma I., Geballe T. H., Moyzhes B. I., Kenny T. W. Measurements of cooling by room-temperature thermionic emission across a nanometer gap // *Appl. Phys. Lett.*— 2003.— Vol. 94, N 7.— P. 4690.

8. Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н., Тетрадзе М. О., Девидзе Т. Н. Исследование процесса электролитического осаждения толстого слоя меди при получении конформных поверхностей в многослойных структурах // *Микроэлектроника.*— 2007.— Т. 36, № 2.— С. 136—140.

9. Талиашвили З. И., Вардосанидзе Л. Р., Джангидзе Л. Б., Тавхелидзе А. Н. Регулирование адгезионной прочности тонких металлических пленок в многослойных структурах // *Микроэлектроника.*— 2007.— Т. 36, № 5.— С. 359—367.

10. Фриш С. Э. Оптические методы измерения. Ч. 2. Лучевая оптика и границы его применения.— Л.: ЛГУ, 1980.

11. Лайнер В. И. Защитные покрытия металлов.— М.: Металлургия, 1974.

12. Вагранян А. Т., Петрова Ю. С. Физико-механические свойства электролитических осадков.— М.: Изд-во АН СССР, 1960.

13. Дасоян М. А., Пальмская И. Я., Сахарова Е. В. Технология электрохимических покрытий.— Л.: Машиностроение, 1989.

14. Вайнер Я. В., Дасоян М. А. Технология электрохимических покрытий.— М.: Машиностроение, 1972.

15. Гиндлин В. К. Гальванотехника в полиграфии.— М.: Изд-во «Книга», 1965.

16. Поветкин В. В., Ковенский И. М. Структура электролитических покрытий.— М.: Металлургия, 1989.

17. Поперека М. Я. Внутренние напряжения электролитически осажденных металлов.— Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. издат., 1966.

18. Ландсберг Г. С. Оптика.— М.: Наука, 1967.

### НОВЫЕ КНИГИ

**Петров Б. М. Прикладная электродинамика вращающихся тел. Учебное пособие для вузов.— М.: Горячая линия – Телеком, 2009.— 288 с.**

Сформулирована ковариантная форма уравнений Максвелла для объектов, возбуждаемых электрическими и магнитными токами. Даны отождествления тензорных объектов и компонент бивекторов и векторных плотностей объектов электромагнитного поля. Получены материальные уравнения, установлены формулы перехода от объектов вращающейся системы отсчета (СО) к объектам инерциальной СО и обратно. Для компонент векторных потенциалов получены системы уравнений во вращающейся СО, играющие роль волновых, найдены их общие решения; последние использованы для решения прикладных электродинамических задач. Проанализированы и рассчитаны характеристики направленности и частотные характеристики излучателей и отражателей. Обнаружены эффекты расширения полосы частот и изменения направленных свойств излучателей. Приведены результаты расчетов и эксперимента.

Для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей, выполняющих аттестационные (дипломные, диссертационные) работы, научных работников радиотехнических и радиофизических специальностей.

