

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 НАНОЗАЗОРОМ

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/см² [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 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$) в термостабилизированной ванне с механическим перемешиванием электролита при плотности тока $i=15$ —50 мА/см². 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.

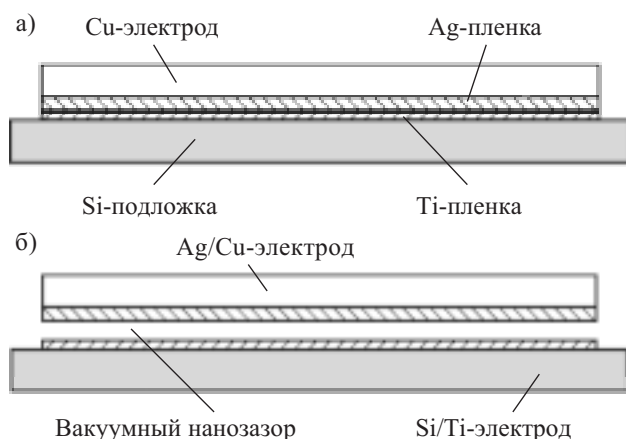


Рис. 1. Многослойный сэндвич Si/Ti/Ag/Cu (а) и конформные электроды, полученные после расщепления сэндвича (б)

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

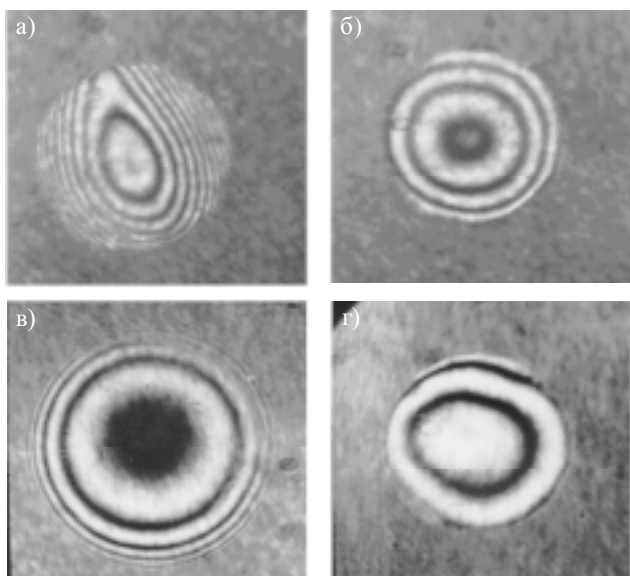


Рис. 2. Интерферограммы поверхности Ag/Cu-электрода (со стороны Ag) (а, б, в) и Si/Ti-электрода (г) после вскрытия сэндвичей, полученных при 35°C: а — без вращения катода; б, в — с вращением катода

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 α металлического электрода использовали формулу $\alpha = \frac{n\lambda/2}{D}$.

$$\alpha = \frac{n\lambda/2}{D}$$

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

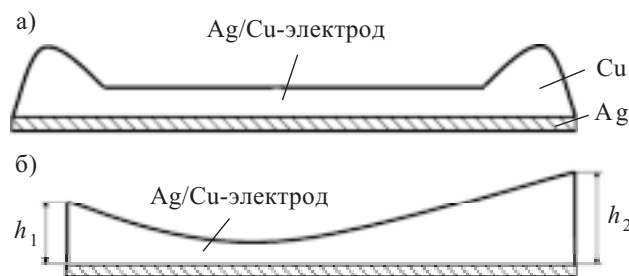


Рис. 3. Электрод Ag/Cu, осажденный без защитной маски (а) и с защитной маской высотой 3 мм (б)

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 разность 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 осажжденного медного электрода диаметром 12 мм приведенный изгиб составил 117 нм/мм.

При сравнении изгибов металлических электродов, осажженных 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/см². 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-

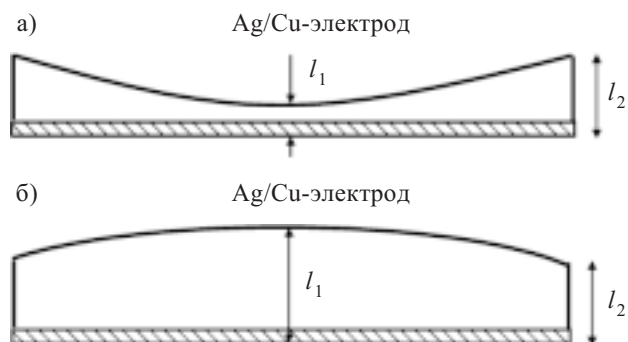


Рис. 4. Вогнутая (а) и выпуклая (б) поверхность меди электрода Ag/Cu, осажженного с конической маской при вращении катода

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_{ϕ} 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 $\Delta h_{\text{ср}}$, $\Delta l_{\text{ср}}$ (различия 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, осажженных с конусообразными масками при вращении катода

Диаметр отверстий маски ($d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$)	$V_{\phi} = 2,5$ об/мин				$V_{\phi} = 10$ об/мин			
	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди
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 выращивание 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 $\Delta l_{\text{ср}}=36$ 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 $\Delta l_{\text{ср}}=8,4$ 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 $i=25\text{—}30$ мА/см². 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/см². Использовали режим как постоянного

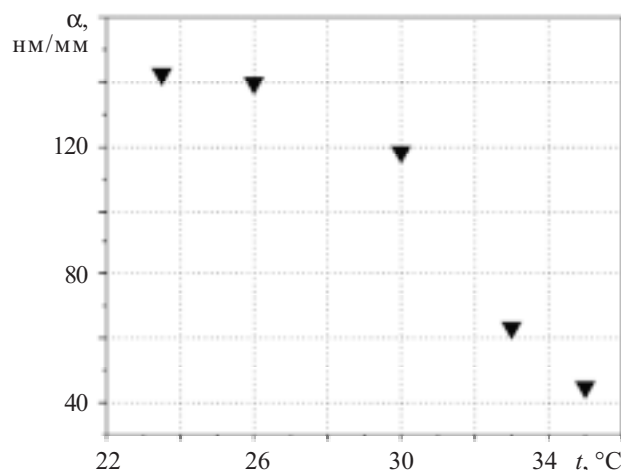


Рис. 5. Зависимость приведенного изгиба электрода Ag/Cu диаметром 12 мм от температуры электролита

(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 α ($\alpha_{\text{ср}}=40$ 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 $i=30\text{—}40$ мА/см² 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 $\alpha_{\text{ср}}$ 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			
	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди	$\Delta h_{\text{ср}}$, мкм	$\Delta l_{\text{ср}}$, мкм	$\alpha_{\text{ср}}$, нм/мм	Форма поверхности меди
Постоянный	—	—	—	—	3	6,7	74	выпуклая
Асимметричный переменный	18,5	13,9	53	вогнутая	11	7,3	40	

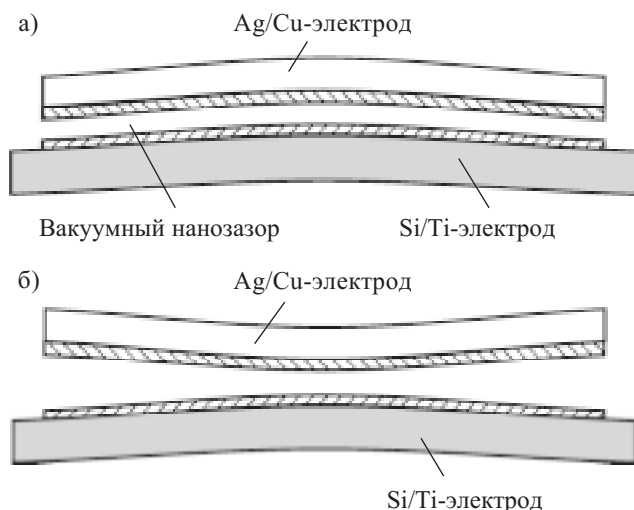


Рис. 6. Сэндвич после вскрытия:

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 $i=30\text{—}40\text{ мА/см}^2$. Это давало возможность уменьшить изгиб до 2,5 нм/мм, а в некоторых случаях получить образцы без изгиба ($\alpha_{\text{ср}} < 2,5\text{ нм/мм}$), 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	
	23,5	26	30	33	35	23,5	35
Доля вогнутых поверхностей, %	54	24	26	80	82	100	85,7

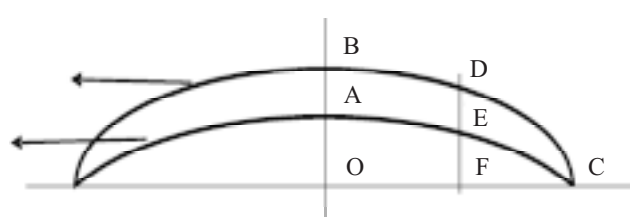


Рис. 7. Поперечное сечение сэндвича:

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, $H=AB$; δ — 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 $\delta=5\text{ нм}$, а H определяли из выражения $H=n\lambda$ (n — число колец в интерферограмме, $\lambda=3164\text{ Å}$).

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 ²	Общий изгиб	Площадь контакта, мм ²
<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 мм 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 мм.

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. Tavkhelidze 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. Tavkhelidze 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

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.