УДК 621.315.592:621.793.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Ti, Al, Ni, Cr и Au НА КРЕМНИИ

© 2012 г. К. Д. Ванюхин<sup>1</sup>, С. П. Кобелева<sup>2</sup>, Ю. А. Концевой<sup>3</sup>, В. А. Курмачев<sup>3</sup>, Л. А. Сейдман<sup>1</sup> <sup>1</sup>ИФЯЭ НИЯУ МИФИ, <sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», <sup>3</sup>ФГУП «НПП «Пульсар»

Методом термического испарения в вакууме на пластины кремния КЭФ-20 с ориентацией (100), диаметром 100 мм нанесены наноразмерные пленки Ті, АІ, Ni, Cr и Au. С помощью измерений толщины пленок и поверхностного электросопротивления четырехзондовым методом оценено значение и однородность распределения удельного электросопротивления металлических пленок. Показано, что удельное электросопротивление таких пленок заметно превышает этот параметр для объемных материалов. Наблюдаемое увеличение поверхностного сопротивления на краях пленки связано как с **УМЕНЬШЕНИЕМ ТОЛШИНЫ ПЛЕНКИ.** так и с ростом удельного электросопротивления материала пленки. Отработанные режимы использованы для получения металлических слоев на подложках из нитрида галлия.

Ключевые слова: пленки Ti, Al, Ni, Cr, Au на Si; удельное электросопротивление металлических пленок.

## Введение

Многослойные металлизированные покрытия широко используют, например, для создания омических контактов и барьеров Шотки транзисторов на широкозонных материалах [1]. При этом, так как толщина металлизированных слоев должна выдерживаться с большой точностью, требования к однородности толщины пленок, с которой связано поверхностное сопротивление металлических пленок, являются достаточно жесткими [2, 3]. Поскольку полупроводниковые приборы на основе нитрида галлия содержат контактные системы, состоящие из многослойных металлических покрытий, формирование заданного рисунка на таких, достаточно толстых и многослойных покрытиях прямой фотолитографией затруднительно. Поэтому формирование заданного рисунка на этих покрытиях проводят обратной фотолитографией (технология liftoff), в которой до нанесения покрытия формируют полимерную, часто фоторезистовую, маску. Нанесение металлов идет в отверстия в этой маске и на ее поверхность. Последний материал удаляется при химическом удалении маски. В результате остаются элементы покрытия только в заданных местах.

Использование технологии *liftoff* диктует жесткие требования к технологии и режимам нанесения металлического покрытия:  температура нанесения не должна превышать ~100 °С, чтобы фоторезист не претерпел деградации, потеряв способность легко растворяться в органических растворителях;

 поступление металлических атомов на подложку должно происходить из квазиколлимированного потока, т. е. потока атомов, траектории которых практически параллельны (в противном случае имеет место осаждение металлической пленки на вертикальные стенки отверстий в маске, из–за чего происходит затенение дна отверстия и уменьшение толщины покрытия на дне отверстия);

 атомы всех металлов многослойного покрытия должны поступать на подложку под одним углом, иначе после формирования рисунка элементы из различных металлов будут смещены друг относительно друга.

Для удовлетворения указанным требованиям применяют термическое испарение, при котором источник относят на возможно большое расстояние от подложки, чтобы создать квазиколлимированный поток атомов, поступающий на всю площадь подложки. Источником испарения может быть накаливаемая лодочка или пятно электронно-лучевого испарителя. Электронно-лучевое испарение это производительный метод, но он требует большого расхода испаряемого материала, в частности золота, что не является недостатком при серийном производстве приборов. Преимущество лодочек заключается в экономии испаряемого материала, что очень ценно при разработке лабораторной технологии изготовления прибора. Именно этот метод применили авторы при разработке лабораторной технологии изготовления полупроводникового прибора на основе нитрида галлия. Для отработки режимов напыления использовали кремниевые подложки. Наиболее оптимальные режимы напыления использовали для нанесения многослойных металлических покрытий на подложки из нитрида галлия.

#### Образцы и методы исследования

Напыление металлических пленок Ti, Al, Ni, Cr и Au проводили на серийной установке термического напыления PVD 75 с турбонасосом фирмы Kurt J. Lesker. Предельный вакуум в рабочей камере составлял 4 · 10<sup>-7</sup> мм рт. ст. В рабочей камере были установлены 6 термических испарителей и устройство кварцевого контроля скорости нанесения и толщины пленок. В начале работы откалибровали кварцевый датчик скорости нанесения путем сопоставления его показаний с фактической толщиной пленок используемых металлов, измеренной профилометром с точностью 5 %. Процесс нанесения каждого металла автоматически прерывался по достижении заданной толщины пленки (по показанию датчика). Отклонение от этих значений не превышало 1 нм.

Термические испарители представляли собой лодочки из вольфрама толщиной 0,5 мм с центральной лункой для навески металла диаметром 12 мм и глубиной 3,5 мм. Отработку режимов напыления и определение критических параметров процесса проводили на подложках кремния КЭФ-20 с ориентацией (100) и диаметром 100 мм, установленных на расстоянии 215 мм от испарителей. Такое относительно большое расстояние использовали не только для получения высокой равномерности покрытия, но и из-за того, что полученные пленки и их системы применяли в технологии *lift-off* (обратная фотолитография), где необходимы квазиколлимированные пучки атомов металла. Отработанные режимы использовали для получения многослойных металлических покрытий на подложках из нитрида галлия.

Измерение поверхностного сопротивления пленок проводили на автоматизированной аппаратуре ВИК УЭС 14А (изготовитель ЗАО «ИКИН»). Измерения карт распределения сопротивления выполняли в 49 точках на поверхности. Случайная погрешность измерений поверхностного сопротивления не превышала 1 %. При расчете поверхностного сопротивления были учтены поправки, связанные с увеличением плотности тока на краю пластины [4]. Измерения толщин полученных пленок проводили на профилометре DektakXT Stylus Profiling System производства фирмы Bruker Nano GmbH (Германия).

## Результаты измерений и их обсуждение

На рис.1 показаны места локальных измерений толщины пленки. В каждой точке измеряли толщину три раза и затем усредняли полученные значения. Полученные результаты измерений представлены в табл. 1.

Так как распределение толщины на поверхности подложки определяется только геометрическими соотношениями в камере испарения, то разброс толщины на одинаковом расстоянии от центра испари-



Рис. 1. Места локальных измерений толщины металлических пленок

Таблица 1

# Результаты измерений толщины металлических пленок, осажденных на подложках Si

Место измерения	h, нм					
	Ti	Al	Ni	Cr	Au	
1	30,4	91,8	48,4	328,3	144,9	
2	33,8	98,7	46,4	341,7	141,2	
3	34,9	101,8	50,5	353,1	139,0	
4	32,7	104,5	49,8	343,4	131,0	
5	35,0	98,5	44,9	314,5	116,6	
6	31,5	99,8	48,3	317,8	125,3	
7	35,2	103,1	50,4	332,0	130,5	
8	34,9	99,9	50,8	349,2	137,6	
9	30,8	95,1	47,8	316,6	128,5	

Таблица 2

Результаты измерения усредненной толщины металлических пленок на различных расстояниях от центра подложек

Положение на по- верхности подложки	<i>h</i> , нм					
	Ti	Al	Ni	Cr	Au	
В центре	$34,9\pm1,2$	$101,8\pm1,5$	$50,5\pm1,4$	$353,1\pm2,3$	$139,0\pm1,9$	
На диам. 40 мм	$34,\!15\pm1,\!08$	$101,6\pm2,7$	$49,4 \pm 2,0$	$341,6\pm7,1$	$135,1\pm5,2$	
На диам. 80 мм	$31,9\pm2,10$	96,3±3,60	$47,3 \pm 1,7$	$315,3\pm6,2$	$128,8\pm11,8$	



теля определяется только погрешностью измерений, и значения толщин *h* на одинаковом расстоянии от центра можно усреднять. Полученные таким способом результаты сведены в табл. 2.

Как следует из результатов табл. 2, толщина покрытия на краю подложки диаметром 100 мм (на диаметре 80 мм) в среднем на 7 % ниже, чем в центре, а на диаметре 40 мм в среднем всего на 2—3 % ниже, чем в центре. Предположив, что рассматриваемый источник испаряемого вещества — плоский источник малой площади, находящийся на расстоянии 215 мм



Рис. 2. Поверхностное сопротивление (в Ом/П) металлических пленок:

а — покрытия «титан (8 нм) — золото (148 нм)»; б — пленки хрома; в — пленки никеля; г — пленки алюминия; д — пленки титана

от подложки, и что справедлив закон косинусов, получим, что толщина покрытия на краю подложки диаметром 80 мм должна быть на 6,6 % ниже, чем в центре, а на краю подложки диаметром 40 мм должна быть на 1,7 % ниже, чем в центре. Таким образом, неоднородность распределения толщины пленок практически соответствует расчетным значениям.

Ситуация с поверхностным сопротивлением сложнее. Распределение поверхностного сопротивления пленок представлено на рис. 2. Полученные рельефы дают полное представление о распределении сопротивления пленки по всей площади кремниевой подложки диаметром 100 мм. Результаты измерения сопротивления пленок  $R_{\rm пл}$  сведены в табл. 3. Сравнение с данными по распределению толщины пленок (см. табл. 2) позволяют определить локальное удельное сопротивление металлических пленок  $S_{\rm пл}$  и провести сравнение удельного сопротивления пленки с удельным сопротивление металлических пленок  $S_{\rm пл}$  и провести сравнение удельного сопротивления пленки с удельным сопротивление металлических пленок  $S_{\rm пл}$  провести сравнение удельного сопротивления пленки с удельным сопротивлением чистого объемного металла  $S_{\rm мe}$  [5]. Результаты расчетов удельного электросопротивления пленок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Металл	<i>R</i> <sub>пл</sub> , Ом/□.	СКО*, Ом/□ (СКО, %)	$ ho_{\pi\pi}^{\min}$ , мкОм $\cdot$ см	$ ho_{Me}$ , мкОм $\cdot$ см [5]	$\rho_{\pi\pi/}\rho_{\rm Me}$		
Ti	269,2	±18,1 (±6,7)	803	42	19		
Al	0,554	$\pm 0,036$ ( $\pm 6,5$ )	5,1	2,5	2,04		
Ni	2,49	±0,15 (±6)	11,6	6,14	1,9		
Cr	2,471	±0,237 (±9,6)	77,7	14,1	5,5		
Au	0,241	$\pm 0,015$ (6,2)	3,28	2,06	1,55		
* СКО — среднеквадратичное отклонение.							

## Результаты измерения поверхностного сопротивления металлических пленок и расчета их удельного сопротивления

Как и ожидалось, удельное сопротивление полученных пленок превышает табличное удельное сопротивление объемных образцов исходных металлов, что является закономерным результатом для всех тонких пленок [6]. Дело в том, что рост пленок металлов в вакууме на холодной подложке — результат существенно неравновесного процесса, в начале которого образуется большое количество мелких зародышей. Из-за этого пленки, нанесенные на холодные подложки, содержат большое число мелких зерен [6]. В результате в пленке имеется много структурных дефектов и межзеренных границ, которые рассеивают движущиеся электроны, увеличивая электрическое сопротивление пленки. Особенно заметно это у титана, толщина пленки которого меньше, чем для всех остальных исследованных металлов (см. табл. 3). При этом начинает давать вклад и поверхностное рассеяние, которое уменьшает длину свободного пробега электронов. С ростом толщины пленки происходит слияние мелких зерен в более крупные (коалесценция) и снижение влияния отражения электронов от поверхности. Поэтому чем больше толщина пленки, тем меньше ее удельное сопротивление превышает табличное значение для данного металла.

Сопоставление распределений по площади подложки локальной толщины пленок и их поверхностных сопротивлений показало, что неоднородности сопротивления не коррелируют с неоднородностями толщины пленки. Это означает, что удельное сопротивление пленок различно в разных местах на поверхности подложки. В то же время выявлена закономерная корреляция между увеличением сопротивления и уменьшением толщины пленок при движении от центра подложки к ее краям. Действительно, по отношению к значению в центре подложки поверхностное сопротивление пленок возрастает на диаметре 40 мм в среднем всего на 0—5 %, на диаметре 80 мм — в среднем на 13 % (4,5—21 %), а на 5 мм от края подложки диаметром 100 мм — на 25—30 %. Таким образом, удельное сопротивление монотонно растет к краю подложки. Это определяется не только уменьшением толщины пленок при приближении к краю подложки, но и большим влиянием там остаточных газов из–за уменьшения скорости нанесения, чему способствует низкая температура ненагретой подложки. Возможно, что остаточные газы выделяются непосредственно из держателя подложек, температура которого повышается при нанесении пленки из термического испарителя, что существенно сказывается на сопротивлении пленок вблизи держателя.

Как видно из данных табл. 3, сопротивление пленки тем меньше превышает сопротивление массивного чистого металла, чем менее активно металл взаимодействует с остаточными газами (золото). Это подтверждается еще и тем, что наибольшее увеличение удельного сопротивления пленки наблюдается у пленки титана, у которого скорость нанесения была всего 0,4 нм, тогда как у остальных металлов — 1,5—4,0 нм. Известно [6], что чем ниже скорость нанесения пленки, тем большее влияние на ее свойства оказывают остаточные газы.

Если оценивать интегральный разброс поверхностного сопротивления пленки на кремниевой подложке диаметром 100 мм, то он составляет для пленок Ti, Au, Al и Ni всего ±(6—6,7) %, а для Cr в полтора раза больше (±9,6 %). Последнее объясняется, по-видимому, тем, что испарение хрома происходит сублимацией при сравнительно большой мощности, подаваемой на испаритель, из-за чего держатель подложки нагревается сильнее, и из него выделяется больше газов. Эти газы поглощаются участками пленки вблизи краев подложки.

При использовании подложек нитрида галлия диаметром 76 мм интегральный разброс поверхностного сопротивления многослойных пленок Ti/Al/Ni/ Au, полученных при минимальной скорости испарения, существенно меньше и составляет примерно ±(3—4) %, что в полной мере отвечает технологическим требованиям.

#### Заключение

Показано, что метод термического испарения из квазиточечного термического источника позволяет

получить радиальносимметричные металлические слои на пластинах диаметром 76—100 мм с уменьшением толщины пленки на периферии от центра порядка 5—9 %.

Значение удельного сопротивления материала пленки превышает справочные значения для данного металла для пленок в интервале исследованных толщин. Превышение тем больше, чем меньше толщина пленки. Вероятной причиной увеличения удельного сопротивления металлических пленок нанометровых размеров является уменьшение подвижности электронов за счет рассеяния на дефектах пленки, возникающих из-за влияния на структуру пленки остаточных газов, а также, возможно, за счет поверхностного рассеяния электронов.

Использование оптимальных режимов выращивания позволило получить многослойные пленки Ti/Al/Ni/Au на нитриде галлия с разбросом поверхностного электросопротивления порядка 3—4 %.

#### Библиографический список

1. **Куэй, Р.** Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй. – М. : Техносфера, 2011. – 592 с.

2. Васильев, А. Г. СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой – М.: Техносфера, 2011. – 416 с.

3. Васильев, А. Г. СВЧ-транзисторы на широкозонных полупроводниках : учеб. пособие / А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой – М. : Техносфера, 2011. – 256 с.

4. Кобелева, С. П. Методы измерения электрофизических параметров монокристаллического кремния / С. П. Кобелева // Заводская лаборатория. – 2007. – № 1. – С. 60—67.

5. Физические величины : справочник / Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

6. Технология тонких пленок : справочник / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М. : Советское радио, 1977. – Т. 2. – 662 с.

Работа ИФЯЭ НИЯУ МИФИ выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Разработка конструкции и промышленной технологии изготовления твердотельных компонентов на широкозонном материале GaN» № 138/2010У от 10.08.2010.

Измерения поверхностного сопротивления выполнены на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ «МИСиС».

УДК 621.382:621.315.592

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИОДОВ ШОТКИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ

## © 2012 г. И. Г. Пашаев Бакинский государственный университет, Азербайджанская Республика

Исследовано получение и изучены электрофизические свойства Au<sub>x</sub>Ti<sub>100-x</sub>—nSi (где x = 10, 36, 87) и Pb<sub>x</sub>Sb<sub>100-x</sub>—nSi (где x = 52, 70, 87) диодов Шотки. Установлено, что пленки сплавов Au<sub>36</sub>Ti<sub>64</sub> и Pb<sub>52</sub>Sb<sub>48</sub> имеют аморфную структуру, а остальные пленки — поликристаллическую. Определена высота барьера диодов Шотки в зависимости от состава и структуры пленок металла. Выявлено, что электрофизические свойства Au<sub>x</sub>Ti<sub>100-x</sub>—nS и Pb<sub>x</sub>Sb<sub>100-x</sub>—nSi диодов Шотки зависят от состава и структуры пленок металла.

Ключевые слова: термоотжиг, аморфные металлы, диоды Шотки, пленка сплава, высота барьера.

## Введение

В течение последних 25 лет интенсивно изучается аморфное состояние твердых тел в связи с широким применением аморфных полупроводниковых и металлических пленок в ряде областей науки и техники [1—11]. Отличительной особенностью выпрямляющего контакта металл—полупроводник (диод Шотки) является меньшее прямое падение напряжения по сравнению с р—п-переходом. Другая особенность диода Шотки — отсутствие инжекции неосновных носителей заряда из металла в полупроводник. Отсюда следует, что в приборах,

использующих переход Шотки, отсутствует диффузионная емкость, связанная с накоплением неосновных носителей заряда в полупроводниках, что значительно повышает их быстродействие. Для получения более однородной границы раздела (ГР) диодов Шотки (ДШ), изготовленных на основе кремния с различными металлическими слоями, перспективным является материал либо с аморфной структурой, либо с монокристаллической. Практически изготовление интегральной микросхемы с применением ДШ на монокристаллических слоях является более трудной технологической задачей, чем изготовление ДШ с аморф-