

4. Alexeev Y. A., Kazeev M. N., Petit J. Z and θ Current Geometry Features of Metallic Tubes Compression in Pulsed High Magnetic Fields to Study Constitutive Relations at High Strain

Rate/VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Tallahassee, US. 18—23 October, 1998.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2007 г.

The opportunity of nanopowders production due to impact of metal foils, accelerated by a magnetic field pressure

V. P. Smirnov, Y. A. Alexeev, M. N. Kazeev, V. S. Koidan, S. P. Anan'ev,
V. F. Kozlov, Y. S. Tolstov

Russian Research Centre Kurchatov Institute, Institute of Nuclear Fusion, Moscow, Russia

The tool description, results of first experiments on high velocity impact of metallic foils, accelerated by a magnetic field pressure are given in this paper. The purpose of the work is to study foils acceleration dynamics and decomposition and also to measure the dimension of products of explosion. Two metal foils were accelerated by a pulse magnetic field up to relative velocity ~ 1 — 2 km/s. At the impact of the foils, the directed energy, is transferred to thermal energy, during the time of order of sound propagation time in a metal foil. It is shown, that the foils are exploded at relative velocity of impact more than 1 — 1.5 km/s. The size of explosion products of fragments is in range of 5 — 100 nm.

УДК 537.533

Ионно-плазменные процессы в технологии изготовления матричных фоточувствительных элементов из КРТ

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, М. В. Седнев
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Проведены исследования тепловых нагрузок, возникающих в процессах ионно-плазменных процессов напыления и травления. Разработаны и оптимизированы режимы ионно-плазменных процессов напыления, очистки от следов органических загрязнений и окислов для технологии матриц фотодиодов из структур кадмий—ртуть—теллур (КРТ), в которых температура пластин не превышает 70 °C. Представлены результаты формирования ионно-плазменным травлением матриц индиевых столбчатых микроконтактов.

Ионно-плазменные процессы широко применяются в современной технологии изготовления полупроводниковых приборов, в том числе изделий микрофотоэлектроники. В технологии изготовления матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе эпитаксиальных структур КРТ перспективно применение таких ионно-плазменных процессов как ВЧ-катодное и магнетронное распыление металлов и диэлектриков, плазмохимическая обработка для удаления загрязнений, адсорбированных молекул воды, остатков органики и фоторезиста, ионно-лучевое травление диэлектрических и металлических покрытий через фоторезистивную или другую маску, плазмохимическое травление слоев и другие процессы. Отказ от жидкостных травителей КРТ в пользу вакуум-

ных процессов с применением только инертных газов существенно повышает однородность характеристик матриц фотодиодов и их стабильность во времени при длительном хранении и использовании.

При применении ионно-плазменных процессов необходимо особое внимание уделять температурному режиму обработки, не допускать перегрева КРТ из-за возможной деградации его характеристик [1, 2]. Поверхность обрабатываемых пластин КРТ, закрепленных, как правило, на несущей подложке, в ионно-плазменных процессах подвергается воздействию ряда факторов: тепловому и ультрафиолетовому излучению, поглощению кинетической энергии падающих заряженных частиц (ионов и электронов), выделению тепла вследст-

вие химических реакций [3]. Каждый из этих факторов приводит к возрастанию температуры обрабатываемых пластин и внутрикамерной оснастки.

Отвод тепла от обрабатываемой пластины КРТ происходит за счет теплопередачи через подложку в подложкодержатель и теплового излучения с поверхности, а конвективный теплоотвод в условиях рабочих давлений, характерных для ионно-плазменных процессов, незначителен. Поскольку основным каналом отвода тепла все же является сброс на подложкодержатель, то в случае отсутствия сплошного теплопроводящего слоя (клей, теплопроводная паста или прокладка) в месте контакта подложки с подложкодержателем теплоотвод может оказаться малоэффективным для сброса тепловых потоков, поступающих на обрабатываемую поверхность, что приводит к недопустимому увеличению температуры образца КРТ.

Проведены исследования по определению оптимальных режимов обработки пластин КРТ в процессах плазмохимической очистки, магнетронного напыления и ВЧ-катодного травления, используемых в технологии изготовления МФЧЭ на основе материала КРТ. Для этих процессов применяется вакуумное оборудование с возбуждением плазмы генератором мегагерцового диапазона частот (13,56 МГц). Обрабатываемая пластина КРТ на подложке крепится на массивный подложкодержатель, служащий одним из электродов и охлаждаемый протоком внутри него воды комнатной температуры. Создаваемый специальными приемами хороший тепловой контакт подложки с подложкодержателем обеспечивает эффективный теплоотвод.

При измерении температуры поверхности пластин КРТ в ионно-плазменных процессах учитывались некоторые их особенности. Во-первых, в обрабатываемой структуре (пластина КРТ на подложке) устанавливается соответствующий градиент температуры, а наиболее важна температура именно на самой поверхности. Во-вторых, плазма высокочастотного разряда способна повредить термодатчик или создать в его цепи наведенное поле, которое вносит значительные искажения в измеряемое значение электрического сигнала датчика и, следовательно, температуру.

Поскольку применение пирометрической аппаратуры для измерения температуры поверхности КРТ в условиях вакуумных ионно-плазменных процессов проблематично, для этих целей использовали тонкопленочный резистор ($R \sim 20 \text{ Ом}$) из никеля толщиной $\sim 100 \text{ нм}$, напыленный на сапфировую пластину толщиной $0,3 \text{ мм}$ и защищенный напыленным толстым слоем ($\sim 200 \text{ нм}$) Al_2O_3 , стойкого к воздействию плазмы. Также использовалась термопара хромель-алюмель диаметром

$0,3 \text{ мм}$. Терморезистор закрепляли на подложкодержателе, а термопару плотно крепили на поверхности пластины КРТ.

На рис. 1 приведена температура в процессе плазмохимической очистки поверхности эпитаксиального слоя КРТ от органических загрязнений и остатков фоторезиста в плазме кислорода при его парциальном давлении $\sim 10 \text{ Па}$. Температуру измеряли после установления стационарного температурного режима через 10 мин после включения плазмы. При измерении высокочастотное напряжение, возбуждающее плазму, кратковременно выключалось. С увеличением мощности температура поверхности образца КРТ монотонно возрастает. При плотности мощности $0,25 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ температура составляет $50\text{—}60 \text{ }^\circ\text{C}$. Незначительные расхождения в измерениях температуры терморезистором и термопарой обусловлены физическими и конструктивными особенностями этих датчиков. При плотности мощности $0,75 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ терморезистор показывает температуру на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем температура термопары, потому что тонкопленочный резистор регистрирует температуру тонкого чувствительного слоя на поверхности терморезистора, что больше соответствует реальной температуре на поверхности КРТ. В то же время температура, измеряемая термопарой, больше соответствует средней температуре в слое КРТ.

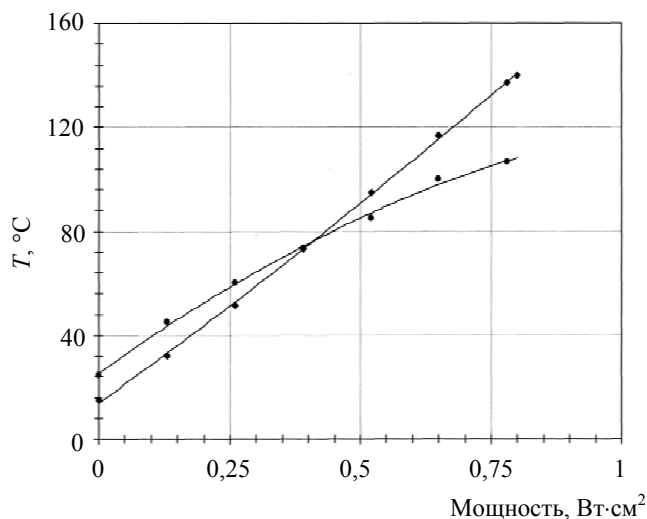


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности КРТ от ВЧ-мощности при плазмохимической очистке:
—♦— терморезистор; •— термопара

Таким образом, при кратковременных воздействиях (до 10 мин) нельзя превышать мощность свыше $0,6 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, что соответствует температуре образца $100 \text{ }^\circ\text{C}$, а при длительных воздействиях — свыше $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, что соответствует температуре образца $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

В процессе магнетронного напыления металлов необходимая плотность мощности, возбуждающая

плазму, составляет величину $1,5\text{--}2 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, что вызывает нагрев образца КРТ. При напылении толстых слоев, требуемых по технологическому процессу, КРТ нагревается выше критических температур. Для снижения тепловой нагрузки был предложен процесс с кратковременными выключениями плазмы. Для измерения температуры при проведении такого процесса использовали термодатчик, закрепленную на поверхности КРТ.

На рис. 2, а приведено изменение температуры образца КРТ в процессе магнетронного напыления золота при плотности мощности плазмы $1,8 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ и парциальном давлении аргона $P = 6 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$. Одна кривая получена при проведении процесса с кратковременными (2 мин) выключениями плазмы, вторая — отражает изменение температуры при непрерывном напылении слоя (толщина слоя 1 мкм в обоих случаях). Видно, что прерывание процесса позволяет уменьшить температуру процесса. При непрерывном напылении можно проводить процесс в течение 20 мин и получить слой золота толщиной $\sim 300 \text{ нм}$, при этом температура не превышает $80\text{--}85 \text{ }^\circ\text{C}$. Для получения более толстого слоя золота необходимо применять процесс с кратковременными выключениями плазмы.

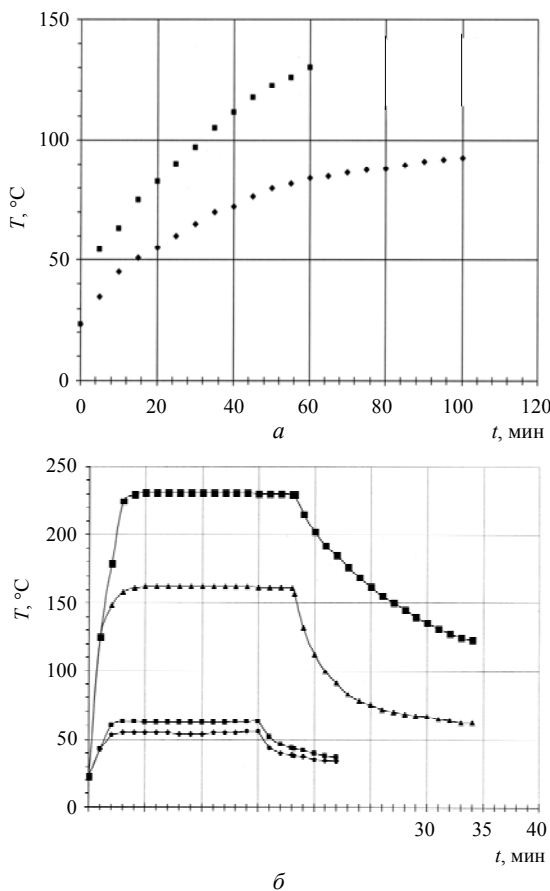


Рис. 2. Температура КРТ в процессе:

а — магнетронного напыления золота. (Потенциал катода 550 В, ток катода 0,15 А); \blacklozenge — кратковременное выключение генератора; \blacksquare — непрерывный процесс; б — ионно-плазменного травления; \blacklozenge — напряжение катода 200 В (образец приклеен); \blacksquare — 200 В (образец без приклейки); \blacktriangle — 500 В (образец приклеен); \blacksquare — 500 В (образец без приклейки)

Традиционная жидкостная химическая обработка пластин КРТ перед загрузкой в вакуумные технологические установки не позволяет полностью удалить все загрязнения. Кроме того, в процессе загрузки в технологические камеры вносятся дополнительные загрязнения. Финишная очистка осуществляется ионно-плазменной обработкой в едином вакуумном процессе непосредственно перед напылением пленочных покрытий. Для этого используется обработка ионно-плазменным травлением инертными газами, как правило, аргоном.

На рис. 2, б показано изменение температуры образца КРТ в процессе ионно-плазменного травления ионами аргона при напряжении смещения катода 200 и 500 В. Для улучшения теплоотвода в некоторых случаях образец приклеивали к подложкодержателю. Температура образца быстро увеличивается в течение нескольких минут, затем стабилизируется на определенном значении, а после выключения плазмы она спадает. При напряжении на катоде 500 В, соответствующем плотности мощности плазмы $1 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, температура неприклеенного к подложкодержателю образца достигает $230 \text{ }^\circ\text{C}$, а приклеенного — $165 \text{ }^\circ\text{C}$. При уменьшении потенциала катода до 200 В (плотность мощности $0,13 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$) температура значительно меньше и составляет 65 и $55 \text{ }^\circ\text{C}$ на неприклеенном и приклеенном образцах, соответственно.

В процессах очистки плазмохимическим травлением в плазме кислорода, магнетронного напыления и ионно-плазменного травления ионами аргона при равной плотности мощности в разряде наибольший разогрев происходит в процессе ионно-плазменного травления ионами аргона, поскольку высокая энергия ударяющихся ионов аргона определяет больший разогрев материала, подвергаемого обработке. Для снижения разогрева образца были применены прерывистые процессы для ионной очистки от окислов индия столбчатой системы микроконтактов МФЧЭ, проводимой перед стыковкой с кремниевой схемой предварительной обработки сигнала. В табл. 1 представлены характеристики некоторых режимов: напряжение смещения катода U , время процесса t (запись $3 \times 2'$ означает, что во время процесса катодное напряжение включалось 3 раза по 2 мин с перерывами по 5 мин для остывания образцов), и толщина снятого слоя h и максимальная температура образцов во время процесса T_{max} .

Таблица 1

| № | U , В | t , мин. | h , нм | T_{max} , $^\circ\text{C}$ |
|---|---------|---------------|----------|-------------------------------------|
| 1 | 200 | $5 \times 2'$ | 32 | < 60 |
| 2 | 300 | $2 \times 2'$ | 32 | 64 |
| 3 | 300 | $3 \times 2'$ | 42 | 64 |

Ионно-лучевое и ионно-плазменное травление через маску фоторезиста позволяет получить ми-

нимальные размеры структур за счет отсутствия подтравки по сравнению с традиционным методом жидкостного травления. Это достоинство является приоритетом применения таких процессов в современной технологии электронных микросхем, в том числе и для изделий микрофотоэлектроники. В результате ионной бомбардировки травятся все материалы, хотя и с различными скоростями. Скорости ионного травления ряда материалов, применявшихся в разработке технологии МФЧЭ из КРТ, представлены в табл. 2. Средняя плотность потоков энергии ионов для ионно-плазменного травления составляет $\sim 0,7 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ (давление аргона $6\cdot 10^{-1} \text{ Па}$, напряжение катода 400 В, ток 80 мА), а для ионно-лучевого травления $\sim 2,7 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ (давление аргона $2\cdot 10^{-1} \text{ Па}$, ускоряющее напряжение 1,6 кВ, ток 34 мА).

Таблица 2

| Материал | Скорость травления, нм/мин | |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| | ионно-плазменное | ионно-лучевое |
| КРТ | 23 | 92 |
| Al ₂ O ₃ | 0,5 | 2,5 |
| Cr | 0,7 | — |
| Au | 2 | 11 |
| Ni—Cr | 0,8 | — |
| Фоторезист ФП-383 | 5 | 22,5 |
| ZnS | 4,5 | — |
| Собственный окисел КРТ | 6 | — |
| CdTe | 10 | — |
| Mo | 1,1 | 2,5 |
| In | — | 35 |
| Si | — | 4,2 |
| TiO ₂ | — | 1,7 |

Из данных табл. 2 видно, что наибольшая скорость травления у материала КРТ с мольной долей кадмия $x = 0,2—0,3$, а наиболее стойкими являются TiO₂ и Al₂O₃. Из металлов наибольшую скорость травления имеет индий.

Одной из проблем в технологии является получение системы индиевых столбчатых микроконтактов как на матрице фотодиодов из КРТ, так и на матрице кремниевой СБИС.

Получение индиевых столбов высотой 10—15 мкм традиционным химическим травлением через маску фоторезиста при шаге между элементами 28—30 мкм имеет принципиальное ограничение. Поскольку процесс глубокого (на толщину слоя напыленного индия) травления происходит изотропно, формируемые столбики утавливаются на величину, равную удвоенной высоте столбов. В результате маска фоторезиста подмывается тра-

вителем (подтрав). При ионно-плазменном травлении этого недостатка нет. Ионы падают нормально к обрабатываемой поверхности и формируют структуры столбиков с почти вертикальными стенками. На рис. 3 представлена профилограмма индиевых столбиков, полученных ионно-плазменным травлением ионами аргона через маску фоторезиста. Индиевые столбы высотой $\sim 10 \text{ мкм}$ сформированы на матрице кремниевой СБИС с шагом 28 мкм.

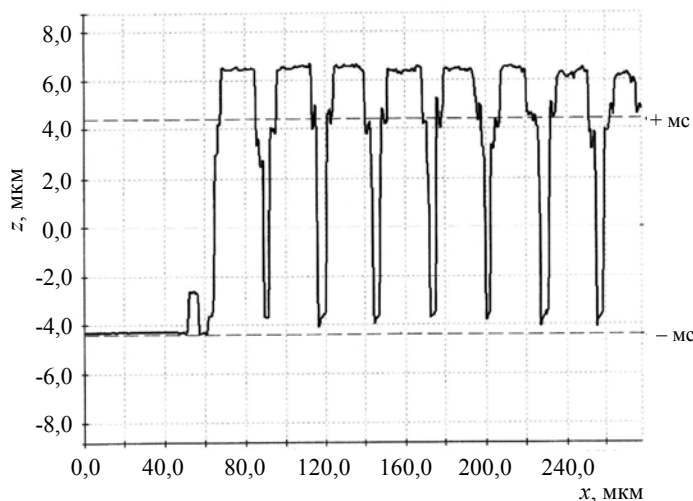


Рис. 3. Профилограмма индиевых столбиков, полученных ионно-плазменным травлением

Заключение

Ионно-плазменные процессы нашли широкое применение при изготовлении МФЧЭ из КРТ на различных стадиях технологического изготовления. При их использовании следует учитывать тепловую нагрузку на образец, не допускать перегрева структуры КРТ. Исследования позволили оптимизировать режимы проведения процессов при изготовлении фоточувствительных элементов матричных фотоприемных устройств различных форматов.

Литература

1. Бовина Л. А., Стафеев В. И. Узкозонные растворы CdHgTe: Физика соединений A²B⁶/Под ред. В. И. Стафеева. — М.: Наука, 1986. — 246 с.
2. Бовина Л. А., Стафеев В. И. Фотодиоды и фотодиодные матрицы на основе Cd_xHg_{1-x}Te//Прикладная физика. 1999. № 2. С. 58—62.
3. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986. — 232 с.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

MCT photosensitive diodes array ion-plasma technology

I. D. Burlakov, K. O. Boltar, M. V. Sednev
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Wafer thermal overhear arising during magnetron sputtering, plasma-chemical etching, HF-cathode etching processes is investigated. Ion-plasma processes of sputtering, cleaning and etching are developed in which the temperature of processed HgCdTe photosensitive array does not exceed 70 °C. Ion-etching formation of indium bump microcontact array is reported.

УДК 537.311.33

Плазмохимическое осаждение пленок диоксида и нитрида кремния для пассивации поверхности КРТ

В. В. Васильев, А. В. Войцеховский, Ф. Н. Дульцев, Т. А. Земцова,
И. О. Парм, А. П. Соловьев
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Для эпитаксиальных структур CdHgTe (КРТ) с варизонным слоем разработана технология получения пассивирующего покрытия "диоксид кремния—нитрид кремния" с использованием плазмохимических процессов. Проведено комплексное физико-химическое и электрофизическое исследование диэлектриков. Определены оптимальные технологические условия синтеза двухслойного диэлектрика. Для определения основных параметров МДП-структур использованы измерения высоко- и низкочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ). Определены значения напряжений плоских зон, плотности фиксированного заряда. Показано, что для структур CdHgTe/SiO₂/Si₃N₄ типичен малый отрицательный заряд, плотность которого не превышает 2·10⁻⁵ Кл/м². Тангенс угла диэлектрических потерь составляет 1·10⁻² на частоте 500 кГц. Плотность токов утечки при температуре 80 К не превышает 1·10⁻⁹ А/см² при 5·10⁵ В/см.

Осаждение диэлектрических пленок с плазменной активацией реагентов для пассивации структур CdHgTe затруднено в связи с сильным воздействием плазмы на поверхность. В частности, в приповерхностной области формируются радиационные дефекты донорного типа и высвобождается химически несвязанная ртуть, которая может диффундировать в кристалл, формируя донорные центры на значительной глубине. Для материала *p*-типа эти процессы обычно приводят к конверсии типа проводимости в приповерхностной области КРТ.

Нами разработаны установки с пространственным разделением областей возбуждения ВЧ-ряда и расположения подложек КРТ, что позволяет исключить ионное и электронное воздействие плазмы на поверхность полупроводника. Диэлектрическое покрытие, используемое для пассивации, должно удовлетворять ряду достаточно жестких условий:

- низкая температура синтеза (не более 100 °С);
- низкая поверхностная плотность встроенного заряда ($\leq 1 \cdot 10^{11}$ см⁻²);
- хорошие адгезионные свойства, сохраняющиеся при различных технологических операциях;
- стабильность во времени и при термообработках.

Этим требованиям удовлетворяет двухслойный (диоксид кремния—нитрид кремния) диэлектрик. Технические особенности плазмохимических установок, использованных для выполнения данной работы, а также физико-химические методы исследования (эллипсометрии, адсорбционной порометрии, ИК-спектроскопии, РФЭС и др.) подробно описаны в работах [1—3].