

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 000099 *

КИРЮШИН Игорь Владимирович

УДК [621.38.049.77.002.3:539.219.3]:539.37/38

**МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ
И ИХ РЕЛАКСАЦИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ
С ТОНКИМИ ПЛЕНКАМИ**

(Специальность 05.27.01—Твердотельная электроника,
микроэлектроника)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Минск — 1989

Работа выполнена в /кституте электроники Академии наук
Белорусской ССР

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
:ОЛЕЖО В.М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор КОМАРОВ Ф.Ф.;
кандидат технических наук, доцент
ИВАН В.М.

Ведущая организация: НИО "Электроника" (г.Воронеж)

Защита состоится " 03 1990 г. в /(/ час. на
заседании специализированного совета Д.006.20.01 при Институте
электроники Академии наук Белорусской ССР.
220641 Минск-ЭО, Логойский тракт, 22

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
электроники АН ВССР.

Автореферат разослан 15. 02. 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совет
кандидат технических наук

А.Б.Гулай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Полупроводниковые структуры с тонкими пленками широко используются в микроэлектронике при производстве интегральных микросхем (ИМС) и дискретных полупроводниковых приборов. В отличие от массивных тел, тонкие пленки, сконденсированные на подложки, находятся в состоянии, характеризуемом структурно-фазовой нестабильностью, размерным эффектом и, как правило, высоким уровнем механических напряжений. Стремление тонкой пленки к равновесию вызывает релаксацию внутренних напряжений. С одной стороны, механические напряжения в тонких пленках существенно влияют на электродиффузионную деградацию металлизации, электрофизические параметры полупроводниковых приборов, снижают выход годных. С другой стороны, напряжения, связанные с дефектами кристаллического строения, преднамеренно вводимыми в полупроводниковую подложку, являются движущей силой процесса генерирования атомов нежелательных примесей и, тем самым, способствуют улучшению параметров и увеличению выхода годных ИМС.

В связи с этим целью диссертационной работы является исследование механических напряжений и их релаксации в полупроводниковых структурах с тонкими пленками широкого класса материалов, используемых в микроэлектронике, в том числе при токе высокой плотности, и разработка рекомендаций по практическому использованию полученных результатов.

Достижение цели работы потребовало решения следующих задач:

- разработать модель тонкой пленки на подложке, характеризующую механические свойства;
- проанализировать уравнения пластичности твердого тела и разработать диаграммы механизмов пластической деформации (ДМД) тонких пленок и элементарных монокристаллических полупроводников;
- исследовать образование и релаксацию механических напряжений в тонкопленочном проводнике, возникающих при электромиграции на постоянном и пульсирующем токе, а также массоперенос;
- исследовать напряжения и их релаксацию в тонких пленках алюминия и кремния с помощью ДМД;
- исследовать процессы дефектообразования в элементарных монокристаллических полупроводниках с помощью ДМД и разработать диаграммы генерирования;
- разработать способы расчета напряжений и устранения вредных последствий их действия в многослойных структурах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих основных положениях. С учетом особенностей тонких пленок разработаны ДМД конденсаторов ряда используемых в микроэлектронике ГЦК-, ГНУ-, ОЦК-металлов и элементарных полупроводников. Высокие концентрация избыточных вакансий и дисперсность структуры тонких пленок вызывают интенсификацию дислокационной (степенной) ползучести и диффузионной ползучести по сравнению с массивными телами. Разработана модель тонкой пленки на подложке, характеризующая механические свойства, введены и обоснованы понятия низкотемпературного и высокотемпературного пределов текучести, которые обусловлены интенсивной релаксацией напряжений в областях границ зерен и внутри зерен пленки соответственно.

Теоретически показано, что электромиграция может приводить к образованию градиента механических напряжений в тонкопленочном проводнике. Показано, что порог электромиграции определяется, в основном, прочностными свойствами тонкопленочного проводника. Постоянная времени релаксации (установления) электродиффузионных напряжений определяется механическими и диффузионными свойствами материала проводника, его микроструктурными и геометрическими параметрами и температурой. При действии пульсирующего тока массоперенос возрастает, с уменьшением длительности импульса и достигает максимума, когда последняя становится меньше определенного критического значения.

Установлено, что при температурах $T \gg 0,2 T_{гн}$ ($T_{гн}$ - температура плавления тонкопленочного материала) и высоких растягивающих напряжениях (но ниже напряжения течения) релаксация напряжений в тонких пленках **АС** определяется механизмом дислокационной ползучести, причем низкотемпературная ползучесть вызывает релаксацию в области границ зерен, а высокотемпературная - внутри зерен пленки. Дислокационные механизмы релаксации существенно влияют на формирование текстуры отжига в тонких пленках сплавов **АС**.

Показано, что основной вклад в уровень напряжений в тонких пленках $<3\epsilon$, полученных пиролизом моносилана при низком давлении на аморфных диэлектрических подложках, вносят собственные напряжения сжатия. При температурах пиролиза менее 825 К тонкие пленки $st3i$ являются аморфными, при температурах более 850 К - поликристаллическими, а в промежуточном интервале температур пиролиза происходит частичная кристаллизация аморфной фазы в процессе осаждения. Кристаллизация аморфной фазы и рекристаллизация в ходе высокотемпературной обработки тонких пленок ((5t приводят к умень-

нению сжимающих напряжений и смене их знака. Рекристаллизация протекает в условиях интенсивной релаксации растягивающих напряжений путем зернограничной диффузионной ползучести и является динамической. Релаксация исходных напряжений сжатия при отжиге поликристаллических пленок осуществляется путем низкотемпературной дислокационной ползучести.

Разработаны ДМД монокристаллических «5t и ОВ и диаграммы генерирования для оценки эффективности термических методов генерации линейных дефектов в приповерхностном слое монокристаллического полупроводника, содержащем напряженные области.

Разработан метод расчета и минимизации напряжений в многослойных структурах.

Практическая ценность работы состоит в следующих разработках:

- технологический процесс получения пленок путем аммонолиза моносилана при низком давлении в кварцевом трубчатом реакторе, обеспечивающий высокое качество пленок и удлиненный срок службы реактора (а.с. 1292585, а.с.1389596, а.с.1440297);
- технологический процесс получения пленок поликристаллического , обеспечивающий высокое качество пленок за счет улучшения воспроизводимости размера зерен по площади подложки и толщине пленки, а также термостабильности микроструктуры пленок (а.с. по заявке 4296744/25 от 10.08.87 г.);
- метод выбора режимов эффективной генерирующей термообработки пластин монокристаллического $\langle \text{Li} \text{ C} \rangle$ с помощью диаграмм генерирования;
- метод теоретической оценки порога электромиграции тонкопленочных проводников из различных материалов для определения максимальной допустимой плотности тока.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- II Всесоюзной конференции по физике и технологии тонких пленок (проблемные вопросы), Ивано - Франковск, 14-19 мая 1984 г.;
- симпозиуме по микроэлектронике (в рамках двустороннего сотрудничества АН СССР и АН ГДР), Москва, 15-20 октября 1984 г.;
- II Всесоюзной конференции: Структура и электронные свойства границ зерен в металлах и полупроводниках, Воронеж, 19-21 мая 1987 г.;
- УП Международной конференции по тонким пленкам, Нью-Дели (Индия), 7-11 декабря 1987 г.;

- П Всесоюзной научно-технической конференции "Технология и конструирование ПИС и вопросы их производства", Углич Ярославской обл., 20-22 апреля 1988 г.;

- конкурсах работ Института электроники АН БССР, Минск, 1986, 1987 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей, 6 докладов (в тезисах) и получено 7 авторских свидетельств.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы и приложений. Работа изложена на 278 страницах, содержит 14 таблиц, 86 рисунков, 2 приложения и библиографию из 265 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе анализируются литературные данные, касающиеся влияния механических напряжений (σ) на параметры и выход годных ИМС. Рассматривается классификация остаточных напряжений в твердом теле, источники и механизмы релаксации макронапряжений в тонких пленках, расчет механических напряжений в многослойных структурах.

Указывается, что при классифицировании внутренних напряжений в тонких пленках следует учитывать их особенности, связанные со структурно-фазовой нестабильностью, размерным эффектом и влиянием подложки. Отмечается, что из всего комплекса механизмов релаксации напряжений в твердом теле применительно к тонким пленкам в литературе анализируются дислокационное скольжение и диффузионная ползучесть. Подчеркивается, что в существующих способах расчета напряжений в многослойных структурах учитываются лишь термические напряжения.

В целом, внутренние напряжения в тонких пленках и многослойных структурах исследованы в литературе недостаточно, что не позволяет прогнозировать и определять механизмы релаксации напряжений, теоретически оценивать их уровень и, следовательно, воздействие на параметры ИМС.

Во второй главе с целью описания механических свойств тонкопленочных структур, предложена модель тонкой пленки в виде отдельных зерен и силовых связей между ними, а также с подложкой. В отличие от массивного поликристалла, в тонкой пленке напряжение в отдельном зерне может существовать благодаря не только взаимодействию с соседними зернами, но и с подложкой. При этом релаксация напряжений G'' в области границ зерен ведет к ослаблению связей между
лз

кристаллитами, что вызывает переход от ситуации, когда величина σ в пленке контролируется релаксацией ($\sigma_{\text{ГЛ}}$ (по самому быстрому механизму), к положению, когда величина σ в пленке определяется релаксацией внутризеренных напряжений

Релаксацию (σ в тонких пленках ряда ГЦК-, ГПУ-, ОЦК-металлов и элементарных полупроводников исследовали с помощью ДМД, разработанных на основе уравнений пластичности тонких пленок. Рассматривали такие механизмы, как бездефектное течение, скольжение дислокаций, низкотемпературную и высокотемпературную дислокационную ползучесть, зернограничную и объемную диффузионную ползучесть. Пренебрегли двойникованием и ползучестью Харпер-Дорна. В выражениях для скорости пластической деформации ($\dot{\epsilon} < 5$) по дислокационным механизмам использовали значения некоторых постоянных, существенно отличающихся от таковых для массивных поликристаллов, что отражает особенности тонких пленок, связанные со структурно-фазовой нестабильностью и размерным эффектом. Для диффузионной ползучести применяли уравнения пластичности тонкой фольги с учетом высоких напряжений.

Особенностью диаграмм для тонких пленок ПЦК-, ОЦК- и ГПУ-металлов является наличие больших полей дислокационной и диффузионной ползучести (рис.1), чего нельзя сказать о диаграммах пленок **Si** и **Ge**. У **Si** наблюдается смена механизма самодиффузии с соответствующим изменением скоростей деформации при 1250-1300 К. Для всех диаграмм характерны малые поля дислокационного скольжения.

Разработаны диаграммы механизмов деформации монокристаллических **Si** и **Ge** с различной плотностью дислокаций $\rho = 0 - 10^{11} \text{ м}^{-2}$. Рассматривали дислокационное скольжение, ограниченное сопротивлением фононов, решетки (механизм Пайерлса-Набарро) и стопоров, а также дислокационную и диффузионную ползучесть, причем для последней было получено соответствующее уравнение. Диаграммы имеют обширное поле скольжения дислокаций, контролируемого сопротивлением решетки. Диффузионная ползучесть проявляется при высоких плотностях дислокаций. Разработанные ДМД позволяют исследовать дефектообразование в полупроводниках и согласуются с многочисленными опытными данными.

В третьей главе с помощью ДМД определена физическая сущность порога электромиграции (в тонкопленочных Al проводниках длины l (J - плотность тока). Она заключается в том, что установившаяся электромиграция начинается тогда, когда "электродиффузион-

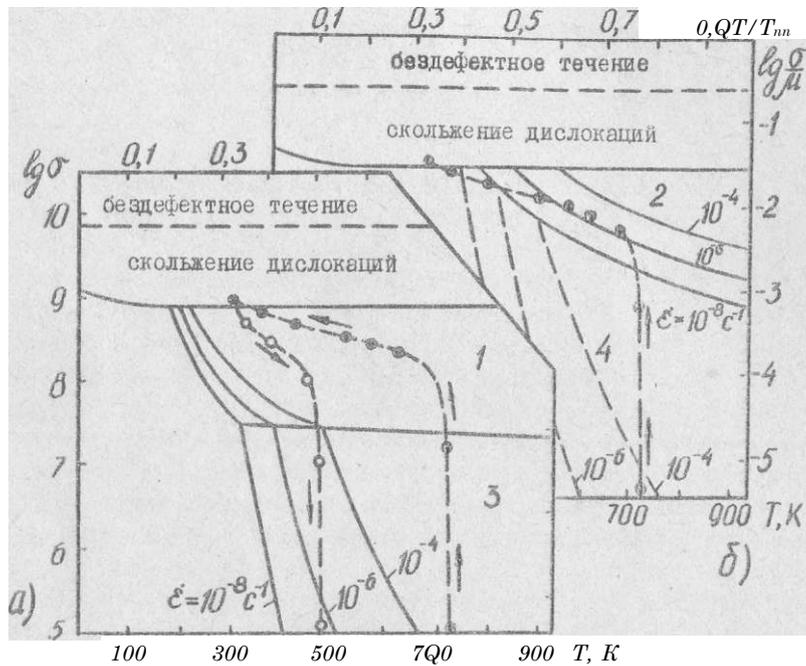


Рис 1 ДМД пленок At ($l = 0,2 \text{ мкм}$): а - (T_{rf} ; б -
 Механизмы: 1,2 - дислокационная ползучесть (1 - низкотемпературная, $\dot{\epsilon} \sim G^{-1}$; 2 - высокотемпературная, $\dot{\epsilon} \sim G^{-1}$); 3,4 - диффузионная ползучесть (3 - зернограничная, 4 - объемная). Термоциклирование пленок At : <a - охлаждение в первом цикле, O - нагрев во втором цикле [7]

ные" механические напряжения начинают интенсивно релаксировать по механизму скольжения дислокаций (при $T < 470 \text{ K}$) или высокотемпературной дислокационной ползучести (при $T > 470 \text{ K}$). Иными словами, величина порога электромиграции определяется пластичностью тонкопленочного проводника $\sigma_{\text{порог}} \propto \frac{Zj_0}{Z}$ где $\sigma_{\text{порог}}$ - модуль сдвига, Z - эффективный заряд, j_0 - удельное электросопротивление. В результате "надпороговой" пластической деформации в анодной части проводника растут бугорки и нитевидные кристаллы.

В порядке убывания порога электромиграции металлы располагаются в виде 5 групп следующим образом: благородные (а также

ПВ группы, тугоплавкие, платиновые и мягкие легкоплавкие. Среди d-элементов величина порога электромиграции убывает с возрастанием номера группы в периодах таблицы Менделеева. Теоретические результаты подтверждаются многочисленными экспериментальными данными.

Установлено, что процесс электромиграции при действии "электронного ветра" и градиента механических напряжений вдоль тонкопленочного проводника описывается уравнением в частных производных второго порядка:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{D}{L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{D}{L^2} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{D}{L^2} u$$

Здесь K, ν - модуль объемного сжатия, модуль Юнга и коэффициент Пуассона тонкопленочного материала, Ω - атомный объем, δ - ширина границы зерен, D - коэффициент зернограничной самодиффузии, L - размер зерен, A - постоянная Больцмана, t - время, X - координата вдоль проводника, Φ и Ψ - приращение напряжения и концентрации ионов.

Получена и решена численно система интегро-дифференциальных уравнений с частной производной первого порядка:

$$y(i) = (K/H) \cdot Ziff / JpS. \quad (6)$$

Здесь нормированные величины: $0 \leq X \leq 1$, $X = X$
 $= t/(r/D)$ - координата левого конца, a/l - правого конца проводника). Это позволило показать, что электромиграция может приводить к высоким механическим напряжениям в тонкопленочном проводнике ($C \sim 0,1-10$ ГПа). При соответствующем граничном условии система (3-5) сводится к уравнению (1).

Исследуются механические напряжения и массоперенос в тонкопленочном проводнике при пульсирующем токе. Найдено, что даже при $J \neq 0$ недостижимо равенство нулю величины потока ионов (что осуществимо на постоянном токе за счет взаимной компенсации потоков электро- и механо-диффузии в стационарном состоянии).

Важным параметром является характерное время релаксации (установления) стационарного состояния τ . Как правило, чем ниже $\Gamma_{ш}$, тем меньше τ при прочих равных условиях. Показано, что реализовать преимущества, связанные с высоким порогом электромиграции, можно при использовании Al, Au, Ag , проводники из которых имеют минимальные значения τ ($\approx 10^{21}$ с для $l = 50$ мкм и $T = 475$ К). Для тугоплавких металлов и их силицидов величины τ максимальны.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование релаксации напряжений в тонких пленках Al , его сплавов и Si . Напряжения измеряли емкостным методом и по способу консольной балки с точностью не хуже 10%. Для изучения микроструктуры пленок привлекали рентгеновскую дифрактометрию (метод скользящего пучка), электронографию на отражение, электронную микроскопию, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию. Контролировали также шероховатость поверхности и удельное электрическое сопротивление пленок Si после диффузионного легирования.

С помощью ДМД был проведен анализ релаксации напряжений в тонких пленках Al при их термоциклировании в вакууме. Скорости деформации рассчитывали по соответствующим уравнениям на основании зависимостей

Установлено, что при $T \approx 0,2 T_{ш}$ и при высоких растягивающих напряжениях (но ниже напряжения течения) релаксация напряжений в тонких пленках Al определяется дислокационной ползучестью. Ползучесть, контролируемая самодиффузией по дислокациям, то есть низкотемпературная дислокационная ползучесть, вызывает релаксацию напряжений σ . Высокотемпературная дислокационная ползучесть, обусловленная решеточной самодиффузией, контролирует релаксацию σ . Таким образом, для полного описания возможных механизмов релаксации, в полном соответствии с моделью тонкой пленки, следует использовать две диаграммы (рис. 1). Показано, что гистерезис кривых термоциклирования в координатах $\sigma - T$ может быть связан с влиянием дислокаций (эффект Ваушингера). Действием дислокационной ползучести в тонких пленках Al можно объяснить интенсивное образование сквозных макропор в результате термоциклирования.

Сопоставление результатов измерения напряжений в тонких пленках сплавов алюминия ($Al + 1,5\% Si + 4\% Cu$, $Al + 1\% Ho$, $Al + 1\% Si + 1\% Ho$) на кремнии с ДМД, а также анализ распределения текстуры по толщине пленок позволил установить, что формирование текстуры отжига определяется релаксацией напряжений по дислокационным механизмам, изменением энергии дефекта упаковки Al под действием добавок и рекристаллизацией.

Изследовались напряжения, микроструктура и фазовый состав тонких пленок Si , полученных пиролизом моносилана ($5\% Si + 95\% Al$) при низком давлении на кремниевых подложках, покрытых слоем SiO_2 или SiO_x , в том числе пленок, содержащих аморфную составляющую.

С помощью рентгено- и электронодифрактометрии обнаружено протекание кристаллизации аморфной фазы в ходе получения пленок Si при 825-845 К. Из кинетики осаждения O_2 установлено, что энергия активации осаждения составляет 139 ± 6 МДж/кмоль ($1,44 \pm 0,06$ эВ/ат) для температур-пиролиза 793-853 К и 169 ± 5 МДж/кмоль ($1,75 \pm 0,05$ эВ/ат) для 833-913 К.

Сжимающие напряжения возрастают в диапазоне температур осаждения 833-853 К. Это может быть обусловлено переходом с температурой конденсации от механизма осаждения пар - переохлажденная жидкость к механизму пар - кристалл с окислением кристаллических зародышей остаточными газами в процессе роста пленки Si , что подтверждается рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией в пленках обнаружено соединение SiO_x ($1,66 \leq x \leq 1,92$), причем интенсивность пика кислорода уменьшается с ростом температуры осаждения.

Установлено, что в ходе высокотемпературного отжига тонких двухфазных пленок Si происходит кристаллизация аморфной фазы с последующей рекристаллизацией, что приводит к уменьшению сжимающих напряжений и образованию растягивающих напряжений. С помощью ДМД найдено, что рекристаллизация протекает в условиях интенсивной релаксации растягивающих напряжений путем зернограничной диффузной ползучести и является динамической (протекает под напряжением).

С использованием ДМД показано, что основной вклад в величину напряжений в тонких поликристаллических пленках Si вносят собственные сжимающие напряжения. Они возникают из-за окисления пленки остаточными газами и частично релаксируют в процессе осаждения благодаря низкотемпературной дислокационной ползучести. Тонкие

пленки, поликремния имеют наименьшие напряжения, если их рост лимитируется гетерогенной реакцией при максимальных температурах (900-920 К) и минимальном давлении остаточных газов. Релаксация исходных напряжений в результате отжига поликристаллических пленок осуществляется путем низкотемпературной дислокационной ползучести.

В результате исследования релаксации напряжений в тонких пленках (на примере At и Li) установлено, что на ДМД температурная зависимость предела текучести представляется двумя кривыми (рис.2). Часть одной из них связана с релаксацией напряжений посредством низкотемпературной дислокационной ползучести и зернограничной диффузионной ползучести (низкотемпературный предел), а часть другой - с релаксацией (T^* путем высокотемпературной дислокационной ползучести (высокотемпературный предел). Указанные кривые совпадают друг с другом при низких температурах ($T/T^* \approx 0,2-0,4$).

На основании ДМД монокристаллического $чУг'$ с помощью предло

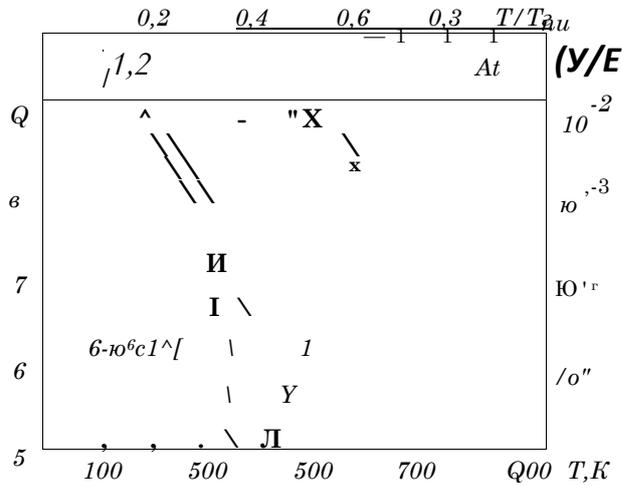


Рис.2 Пределы текучести пленки At на подложке ($h = C_j = 0,1$ мкм, $\xi' = 10^{-1}$): I - низкотемпературный, 2 - высокотемпературный

женного критерия неубывания ξ были разработаны диаграммы генерирования, предназначенные для выбора режимов и оценки зффектив-

f.

ности термических методов генерации дислокаций в приповерхностном слое полупроводника, в котором имелись напряженные области (рис.3).

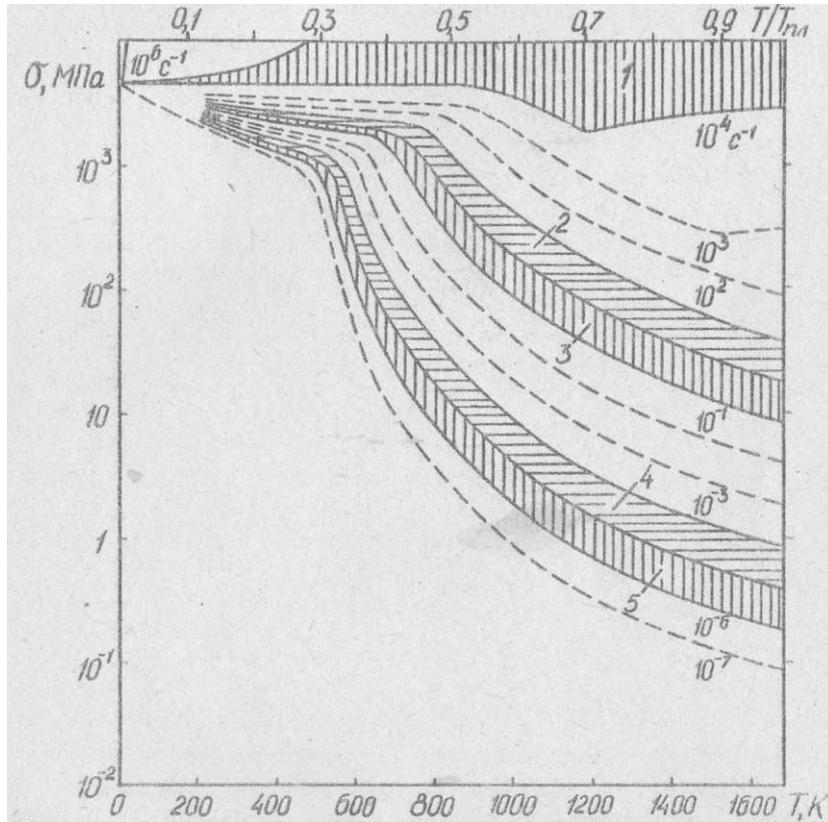


Рис.3 Диаграмма геттерирования для монокристаллического кремния. t_0 (с): 1 - 10^{-6} , 2 - 10^{-2} , 3 - 10^{-1} , 4 - 10^3 , 5 - 10^4

Границы областей "эффективного генерирования", соответствующих различным длительностям t^{\wedge} термического воздействия на полупроводниковую пластину определяли по уравнению $dtq = 0,01$ или $0,10$. Справедливость такого подхода подкрепляется "попаданием" кривых $0 \sim (T)$, рассчитанных по уравнению для импульсного и лазерного отжига, в соответствующие области эффективного геттерирования. Печной отжиг с постоянной скоростью нагрева малоэффективен.

Предложен метод расчета напряжений в многослойных структурах, учитывающий не только термические напряжения, но и собственные.

Напряжения в i -ом слое (нумерация слоев ведется от подложки):

$$\sigma_i = \frac{E_i}{1-\nu_i} \left(\sum_{j=1}^N \frac{H_j}{H} (\alpha_j - \alpha_i) \Delta T + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{H_j}{H} \frac{H_j + 2 \sum_{k=j+1}^{i-1} H_k + H_i}{2z} - \sum_{j=i+1}^N \frac{H_j}{H} \frac{H_j + 2 \sum_{k=i+1}^N H_k + H_i}{2z} - \sum_{j=1}^{N-1} \frac{H_j}{H} (\varepsilon_N - \varepsilon_j) + \varepsilon_N - \varepsilon_i \right) + E_i (z_i - 0,5 H_i) / (2z). \quad (6)$$

$$z = H / \left(6 \left(\sum_{j=1}^N \frac{H_j}{H} (\alpha_j - \alpha_i) \Delta T - \sum_{j=1}^{N-1} \frac{H_j}{H} (\varepsilon_N - \varepsilon_j) + \varepsilon_N - \varepsilon_i \right) \right). \quad (7)$$

Здесь H - суммарная толщина пирога; H_i , E_i , ν_i , α_i - соответственно толщина, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент термического расширения i -го слоя с собственной деформацией ε_i (берется со знаком противоположным знаком собственного напряжения); z - радиус кривизны пирога; ΔT - изменение температуры; z_i - координата точки в i -ом слое, отсчитываемая от его нижней поверхности. Принято, что $H_j \gg H_i$ ($i = 2, \dots, N$).

При таком подходе условие минимальности изгиба и напряжений в слоях, как следует из ур. (7), записывается в виде:

$$\sum_{j=1}^{N-1} (H_j/H) (\varepsilon_N - \varepsilon_j) - \varepsilon_N + \varepsilon_1 = 0. \quad (8)$$

Оно подтвердилось при использовании кремниевого покрытия внутренней поверхности кварцевых реакторов для газофазного осаждения пленок Si_3N_4 . При этом предотвратили катастрофическое отслаивание Si_3N_4 от стенок реактора и, тем самым, добились повышения качества получаемых пленок и срока службы реактора.

ВЫВОДЫ

1. Предложена классификация макронапряжений в тонких пленках, учитывающая их особенности, связанные со структурно-фазовой нестабильностью, размерным эффектом и влиянием подложки.

2. С учетом особенностей тонких пленок разработаны ДМД конденсаторов ряда ГЦ-, ПУ-, ОЦ-металлов и элементарных полупроводников, используемых в микроэлектронике. По сравнению с диаграммами для массивных образцов на диаграммах тонких пленок уменьшилось поле дислокационного скольжения из-за возросшего влияния упрочня-

щих факторов. Высокие концентрация избыточных вакансий и дисперсность структуры тонких пленок вызывают интенсификацию дислокационной ползучести и диффузионной ползучести по сравнению с соответствующими массивными телами. В результате эти механизмы деформации могут проявляться в тонких пленках при температурах более низких ($0,2-0,3 T_{гш}$), чем в массивных поликристаллах ($0,3-0,5 T_{пд}$).

3. Теоретически показано, что электромиграция может приводить к образованию градиента механических напряжений в тонкопленочном проводнике. Порог электромиграции определяется прочностными свойствами тонкопленочного проводника и может характеризоваться величиной $C/(2^0)$. При оценке возможности реализации свойств тонкопленочного материала, связанных с величиной порога электромиграции, следует учитывать время релаксации (установления) электродиффузионных напряжений, которое, в свою очередь, определяется механическими и диффузионными свойствами материала проводника, его микроструктурными и геометрическими параметрами и температурой. При действии пульсирующего тока интенсивность массопереноса возрастает с уменьшением длительности импульса и достигает максимума, когда последняя становится меньше критического значения.

4. Проведены исследования механических напряжений в тонких пленках x и его сплавов. При $T = 0,2 T_{ш}$ и при высоких растягивающих напряжениях (но ниже напряжения течения) их релаксация в тонких пленках At определяется механизмом дислокационной ползучести, причем низкотемпературная ползучесть вызывает релаксацию напряжений в области границ зерен, а высокотемпературная - внутри самих зерен. Дислокационные механизмы релаксации существенно влияют на формирование текстуры отжига в тонких пленках сплавов At

5. Уровень напряжений в тонких пленках Si определяется собственными напряжениями сжатия, вызванными окислением конденсата остаточными газами, а также релаксацией путем дислокационной ползучести.

При температурах пиродиза моносилана менее 825 К получаемые при пониженном давлении тонкие пленки Si являются аморфными, при температурах более 850 К - поликристаллическими, а в промежуточном интервале температур - двухфазными.

При высокотемпературном отжиге пленок Si, содержащих аморфную фазу, происходит ее кристаллизация с последующей рекристаллизацией, что приводит к уменьшению сжимающих напряжений и смене их знака. Рекристаллизация протекает в условиях интенсивной релаксации растягивающих напряжений путем зернограничной диффузионной ползучести и является динамической. Релаксация исходных напряжений

сжатия при отжиге поликристаллических пленок осуществляется путем низкотемпературной дислокационной ползучести.

6. На ДМД температурная зависимость предела текучести тонких металлических пленок на подложках характеризуется двумя кривыми.

Одна из них связана с релаксацией напряжений в области границ зерен посредством низкотемпературной дислокационной ползучести и зернограничной диффузионной ползучести, а другая - с релаксацией внутриверных напряжений путем высокотемпературной дислокационной ползучести. Указанные кривые совпадают друг с другом при низких температурах ($T/T^* < 0,2-0,4$).

7. Разработаны ДМД монокристаллических *5г К б е. Напряжение течения $t\$/$ и $Ств$ определяется сопротивлением движению дислокаций собственно кристаллической решетки и сильно зависит от температуры. Разработаны диаграммы генерирования, позволяющие оценивать эффективность различных термических методов генерации дислокаций в приповерхностном слое монокристаллического полупроводника, содержащем напряженные области.

8. Предложен метод расчета напряжений в многослойных структурах, учитывающий собственные напряжения. Сформулировано условие минимума напряжений в таких структурах, на основании которого разработан способ уменьшения напряжений за счет использования промежуточного слоя кремния в промышленном реакторе для синтеза пленок

N_d , что позволяет повысить качество пленок и срок службы реактора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.с.1292585 СССР, МКИ: НО1L 21/318. Способ получения пленок нитрида кремния / В.М.Колешко, И.А.Таратын, В.Ф.Белицкий, В.Ф.Петрашкевич, А.П.Крищенко, И.В.Кирюшин (СССР). - Заявлено 16.04.85 г.
2. Колешко В.М., Белицкий В.Ф., Кирюшин И.В. Построение диаграмм механизмов деформации тонких пленок // II Всес. конф. по физике и технологии тонких пленок (проблемные вопросы), 14-19 мая 1984 г., Ивано-Франковск, Сб.тез.докл. - 4,2. - С.301.
3. Колешко В.М., Белицкий В.Ф., Кирюшин И.В. Релаксация механических напряжений в тонких металлических пленках // Симпозиум по микроэлектронике (в рамках двусторон.сотрудничества АН СССР и АН ГДР), 15-20 октября 1984 г., Москва, МЦНИ, - С.93-96.
4. Колешко В.М., Белицкий В.Ф., Кирюшин И.В. Механизмы деформации тонких пленок // Вестн! АН БССР. Сер.фХз.-мат.наук. - 1985,

№ 4. - С.67-73.

5. А.с.1389596 СССР. Устройство для загрузки полупроводниковых пластин в цилиндрический реактор горизонтального типа / С.П. Кузьмин, И.В.Кирюшин, Н.И.Данилович, В.А.Бурсов (СССР). - Заявлено 23.05.86 г.

6. А.с.1440297 СССР, МКИ⁴ НОИЛ 21/318. Способ получения пленок нитрида кремния / В.М.Колешко, В.Ф.Белицкий, И.В.Кирюшин, В.Ф.Петрашкевич, А.Г.Шкуратов (СССР). - Заявлено 6.06.86 г.

7. **Koleshko V.M., Belitsvy V.F., Kiryushin I.V. Stress relaxation in thin aluminium films // Thin Solid Films, - 1986.-V.142.-P.199-212.**

8. А.е.1410784 СССР, МКИ НОИт 21/82. Способ изготовления структур МОП-интегральных схем / В.М.Колешко, В.Ф.Белицкий, И.В.Кирюшин (СССР). - Заявлено 1.08.86 г.

9. Колешко В.М., Кирюшин И.В. Диаграммы механизмов деформации металлических и полупроводниковых тонких пленок // И Всес, конф.: Структура и электронные свойства границ зерен в металлах и полупроводниках. Воронеж, 19-21 мая 1987 г. Сб.тез.докл. - С.

10. А.с.по заявке 4304672/25 СССР, МКИ⁴ НОИ L 21/268. Способ получения структур интегральных полупроводниковых схем / В.М.Колешко, И.В.Кирюшин (СССР), - Заявлено 11.09.87 г.

11. А.с.по заявке 4296744/25 СССР, МКИ⁴ НОИZ 21/205, Способ получения пленок поликристаллического кремния / В.М.Колешко, В.Ф.Белицкий, Г.А.Корешков, А.Г.Шкуратов, И.В.Кирюшин, М.В.Кунашкевич, А.Л.Козлов (СССР). - Заявлено 25.09.87 г.

12. А.с. по заявке 4309094/25 СССР, МКИ⁴ НОИZ 27/04, Полевой транзистор и способ его изготовления / В.М.Колешко, И.В.Кирюшин (СССР). - Заявлено 25.09.87 г.

13. **Koleshko V.M., Kiryushin I.V. Deformation mechanisms for metal semiconductor thin films // Abstr. 7th Int. Conf. Thin Films, December 7-11, 1987, New Delhi (India)**

14. Распределение текстуры по толщине тонких пленок сплавов алюминия / Колешко В.М., Белицкий В.Ф., Кирюшин И.В., Заика А.Ф. Румак Н.В. // Поверхность. Физ., хим., мех. - 1987. - № 12, - С.76-83.

15. Колешко В.М., Кирюшин И.В. Порог электромиграции и долговечность тонкопленочной металлизации ПИС // II Всес. научно-техн. конф. "Технология и конструирование ПИС и вопросы их производства", 20-22 апреля 1988 г., Углич Ярославской обл. Сб.тез.докл. - Ч.Т. С.108-109.

