

АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи

ЮНГАНС ТОРАЛЬФ

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ
ЧАСТИЦ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В АМОРФНЫХ
ПЛЕНКАХ ГЕРМАНИЯ

0.1.04.04 - физическая электроника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев - 1993

070 26.02
Работа выполнена в Институте физики АН Украины:

Научный руководитель -- ведущий научный сотрудник, доктор
физико-математических наук
С.А.Непийко

Официальные оппоненты -- член-корреспондент АН Украины,
профессор, доктор физико-математических
наук
С.А.Фиретов

-- профессор, доктор
физико-математических наук
П.И.Баранский

Ведущая организация -- Институт металлофизики АН Украины

Автореферат разослан *18 января* 1993 г.

Защита диссертации состоится *18 февраля* 1993 г. в
в 15.00 часов на заседании Специализированного Совета Д 016.04.01
при Институте физики АН Украины (252650, ГСП, Киев-28, проспект
Науки, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Института физики АН Украины.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
канд. физ.-мат. наук

[Signature]
В.А.Щук

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00825760 (S)



ДВ - 26.097

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. К числу важнейших проблем относится создание и исследование новых классов веществ с необычными физическими свойствами в частности аморфных и высокодисперсных материалов. Особые физические свойства систем, содержащих кристаллические частицы в аморфной матрице того же материала, являются промежуточными между свойствами материала в аморфном состоянии и свойствами малых частиц. Развитие физики аморфного состояния выдвинуло ряд проблем. Важнейшая из них состоит в необходимости описать гетерогенные процессы, вскрыть их природу. Решение этой проблемы - путь к управлению свойствами новых материалов. В этой связи настоятельно необходимо проведение исследований в контролируемых условиях на объектах, которые можно охарактеризовать с максимальной степенью достоверности.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению причин и характера кристаллизации материалов, находящихся в метастабильном состоянии, в частности такой практически интересной системы, как аморфная пленка германия с кристаллическими частицами германия. Особый научный интерес представляет исследование дефектов в кристаллических частицах, что позволяет высказаться о механизмах, лежащих в основе перехода от аморфных пленок к кристаллическим. Проблема экологически чистой энергетики стимулирует интерес к созданию фотоэлектрических преобразователей, обеспечивающих непосредственное преобразование солнечной энергии в электрическую. А интерес к аморфным пленкам германия определяется тем, что они являются близкими к аморфным пленкам кремния, кроме того используются твердые растворы германия с кремнием. Вопросы деградации параметров таких преобразователей, связанные с образованием частиц кристаллической фазы в аморфной пленке германия, к настоящему времени экспериментально не достаточно изучены. Поэтому выяснение разного рода воздействий на процессы кристаллизации в аморфных пленках германия, особенностей строения частиц кристаллической фазы германия, представляет, несомненно, научный и практический интерес. Работа проводилась в соответствии с бюджетной темой: "Кристаллическая структура, электронные и эмиссионные свойства поверхностей, тонких пленок и малых частиц".

Цель работы. Заключается в проведении систематических исследований с помощью электронной дифракции и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения:

- возникновении и закономерностей протекания кристаллизации при

приготовлении аморфных пленок германия и их последующей эксплуатации;

- внешних воздействий приводящих к образованию частиц кристаллической фазы в аморфной пленке германия, являющейся одной из причин деградации этой пленки;
- особенностей строения отдельно взятых частиц, характера и плотности дефектов в них.

Научная новизна заключается в том, что все основные результаты, приведенные в диссертации получены впервые. Прежде всего новым является сам факт исследования строения частиц кристаллической фазы с атомным разрешением в аморфной матрице германия, что позволило сделать выводы о встречающихся дефектах, их плотности, а также визуализировать проявление симметрии пятого порядка, не свойственной массивному состоянию, установить ориентацию образующихся частиц и направления, в которых осуществляется их рост. Расширен круг исследованных воздействий, приводящих к кристаллизации аморфных пленок германия. Практическая ценность определяется тем, что знание условий, приводящих к возникновению частиц кристаллической фазы, позволяет бороться с деградацией аморфных пленок, используемых в фотоэлектрических преобразователях.

На защиту выносятся следующие положения

1. Расширен круг исследованных воздействий, приводящих к образованию частиц кристаллической фазы германия в аморфной пленке германия. В случае термического напыления на грань (001), NaCl , полученную сколом на воздухе, температура образования кристаллических частиц германия составляет $200-220^\circ\text{C}$, подслоя углерода, толщиной 5-7 нм, понижает температуру кристаллизации, уменьшает размер критического зародыша, изменяет морфологию пленки германия (рост островковой пленки сменяется ростом сплошной пленки); отжиг при температуре 350°C увеличивает размеры кристаллитов и их плотность, но тот же отжиг при наличии подслоя углерода приводит уже к образованию сплошной мелкодисперсной поликристаллической пленки,
2. С помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии показано, что частицы кристаллической фазы германия преимущественно образуются с ориентацией, когда одно из направлений типа $[110]$ перпендикулярно границам аморфной пленки германия. Их рост осуществляется в направлении типа $[211]$,
3. Впервые выполнены электронно-микроскопические исследования с

атомным разрешением (разрешение по решетке) частиц кристаллической фазы германия в ее аморфной матрице, характеризующейся не свойственной массивному состоянию симметрией пятого порядка.

4. Показано, что основными дефектами упаковки в частицах германия являются:
 - двойниковые границы (если пять двойниковых границ сходятся, то следствием является пункт 3, наблюдение "пачек" двойниковых границ, когда они располагаются параллельно друг другу на расстояниях нескольких постоянных решетки);
 - малоугольные границы;
 - краевые дислокации.
5. Предложена модель образования экспериментально наблюдаемых двойных осей с симметрией пятого порядка. Она основывается на том, что область, образующаяся при пересечении двух двойниковых полос (зон), претерпевает сильную однородную деформацию, фактически означающую изменение структуры решетки. В каждой вершине этой области сходятся несколько двойниковых плоскостей. Переход от правильной к трансформированной решетке в области пересечения можно рассматривать как межзеренную границу. Преобразование в рассматриваемой области заключается в том, что к этим противоположным вершинам подходит еще по одной дополнительной двойниковой границе, которые к тому же параллельны между собой. При этом обеспечивается сохранение подходной структуры решетки и минимизируется длина субзеренной границы, что делает такое преобразование энергетически оправданным. Вместе с тем, в рассмотренных вершинах сходятся уже по пять двойниковых границ, образующих картину с симметрией пятого порядка.

Апробация материалов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на 2 Всесоюзной конференции по физикохимии ультрадисперсных систем (г.Урмала, октябрь 1989 г.), на конференции "Фактор-90" по моделированию в материаловедении (г.Львов, май 1990 г.), на 14 Всесоюзной конференции по электронной микроскопии (г.Суздаль, ноябрь 1990 г.), на 7 Оксфордской конференции по электронной микроскопии полупроводников (г.Оксфорд, Англия, март 1991 г.), на Весенней конференции Европейского общества материальных исследований (г.Страсбург, Франция, июнь 1991 г.), на Международном симпозиуме о Физике и Химии конечных систем: отчастицы к кристаллу (г.Ричмонд, США, октябрь 1991 г.), на 32 Осен-

ней школе Международного центра по электронной микроскопии (г.Галле, ФРГ, октябрь 1991 г.), на 5 конференции по электронной микроскопии Азиатско-тихоокеанского региона (г.Пекин, Китай, август 1992 г.), на конференции "Рекристаллизация 92" (г.Сан-Себастьян, Испания, сентябрь 1992 г.) и на Первой Международной конференции по наноструктурным материалам (г.Канкун, Мексика, сентябрь 1992 г.)

Публикации. По результатам, представленным в диссертации, опубликовано 7 работ. Список приведен в конце автореферата.

Объем работы. Общий объем работы составляет ~~132~~¹³² страниц машинописного текста, включая ~~425~~ рисунка. Список литературы включает ~~253~~ наименования.

184

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы и определяется цель диссертационной работы на основании анализа результатов исследований, изложенных в предшествующих публикациях о переходном процессе от аморфного состояния к кристаллическому для случая тонких пленок. Из рассмотренной литературы вытекает, что аморфные полупроводниковые пленки вызывают интерес с шестидесятых годов в связи с обнаруженными эффектами переключения и памяти в них. В семидесятых годах интерес к таким пленкам стимулировался развитием солнечной энергетики и разработкой нового экспериментального оборудования для химического осаждения из паровой фазы (CVD) и термовакуумного осаждения из паровой фазы (PVD). Оказалось, что по ряду аспектов кремний, используемый в качестве основного материала для солнечных элементов и транзисторов на тонких пленках, и германий, служащий партнером кремния в этих же приборах с целью улучшению их эффективности, близки друг другу. Ожидается, что использование германия вместе с кремнием может стабилизировать аморфную пленку и ограничить процессы, связанные с деградацией солнечных элементов. Хотя уже есть много экспериментальных работ по определению кинетики кристаллизации, являющейся одной из причин деградации и имеющей большое значение для изготовления тонких полукристаллических мелкодисперсных пленок, применяющихся в выше указанных приборах, пока не было проведено детальное исследование структуры кристаллической фазы тонких аморфных пленок германия с атомным разрешением. Кроме того в диссертационной работе предпринята попытка расширить круг параметров, влияющих на кристаллиза-

цию аморфных пленок. Впервые проведен анализ атомного строения кристаллической фазы германия в его аморфной матрице с помощью электронной микроскопии высокого разрешения.

Глава I. Дан обзор литературы, описывающей аморфное состояние тонких полупроводниковых пленок с решеткой типа алмаза. Из литературы следует, что на сегодня существует две альтернативные модели, описывающие аморфное состояние в таких пленках: микрокристаллическая модель и модель непрерывной случайной сетки. Первая модель основана на том, что аморфное состояние состоит из мелкокристаллических образований ориентированных друг относительно друга случайным образом. Вторая модель основана на образовании сетки из случайным образом связанных тетраэдрических образований. На основании выполненных исследований в диссертационной работе приводятся дополнительные аргументы в пользу микрокристаллической модели. Обсуждены способы приготовления аморфных и кристаллических пленок германия известные в литературе. Из публикаций разных авторов вытекает, что в настоящее время применяются два альтернативных метода препарирования: CVD и PVD. Хотя химические методы изготовления полупроводниковых пленок с решеткой типа алмаза имеют такие достоинства как равномерное распределение примесей, необходимых для улучшения физических свойств пленок, и регулирование притоком химической реакции (при росте пленки), и обратной химической реакции (при травлении пленки), кажутся простым и нами было выбрано термическое напыление в качестве способа приготовления тонких пленок германия. Это связано с тем, что такие основные технологические параметры переходного процесса от аморфного к кристаллическому состоянию как скорость роста кристаллической фазы и размер кристаллитов должны быть известны в каждой точке реактора, в котором происходит химическое напыление, что очень сложно осуществить. Оценку этих же параметров можно выполнить намного точнее в случае термического напыления, для которого скорость роста зависит от температуры источника напыления и расстояния между подложкой и источником напыления. С целью ограничения химической реакции германия, испаряемого в источнике напыления, в качестве материала испарителя был выбран тантал, удовлетворяющий требованиям совместимости с германием при высоких температурах. Определенную проблему представляет выбор подложек для аморфных пленок германия. Требования к подложкам сводятся к удовлетворению условия минимального контраста

при выполнении данного исследования. Основным методом использованным автором диссертации является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) включая ПЭМ высокого разрешения. С этой точки зрения одной из наиболее удобных подложек для тонких пленок германия исследованных с помощью ПЭМ является медная сеточка покрытая тонкой пленкой углерода. Однако такая подложка не применялась в связи с возможной химической активностью меди с германием при нагреве подложек. Поэтому нами был выбран скол $(001)\text{NaCl}$, который растворялся в дистиллированной воде. Пленки германия были выловлены на медные сеточки для последующих наблюдений в ПЭМ.

Глава 2. дан обзор факторов влияющих на кристаллизацию. Из литературы известно, что существуют два подхода объяснения процессов перехода с аморфного состояния к кристаллическому: термодинамический и оптический. Согласно термодинамической модели движение границы раздела между кристаллической и аморфной фазами происходит посредством прыжков атомов между этими фазами через энергетический барьер величина которого определяется свободной энергии Гиббса. Энергия активации, связанная с преодолением энергетического барьера при активации роста кристаллической фазы германия в его аморфной матрице, лежит в интервале между 1.4 эВ и 3.5 эВ [1,3]. Разница в определении этих энергий обусловлена разной чувствительностью методов, применяемых авторами этих работ, и отличающимися условиями приготовления пленок, что тоже существенно. С использованием термодинамического подхода объясняются основные технологические параметры кристаллизации. При энергиях выше порога активации кристаллизации происходит рост кристаллической фазы связанный с возникновением новых зародышей и ростом кристаллитов из них. Чем выше температура пленки, тем быстрее растет кристаллическая фаза. Согласно оптическому подходу, имеющему место при воздействии на аморфные пленки полупроводников лазерным излучением, луч передает свою энергию возбужденным носителям заряда, а аморфная матрица остается сначала при такой же температуре как раньше. С окончанием лазерного импульса носители заряда термализуются и передают энергию фононам в аморфной матрице, которая в силу этого скачкообразно переходит в кристаллическое состояние. Эта модель отличается от термодинамической способом преодоления энергетического барьера и скоростью процесса кристаллизации. Она объясняет падение энергии активации для аморфных пленок облученных лазерным

излучением [10]. Поскольку в настоящей диссертационной работе не применялось лазерное облучение, все обнаруженные эффекты тракту-
ются исходя из термодинамического подхода.

Из литературы известно, что напряжения имеющие место в аморфных пленках содержащих кристаллическую фазу должны влиять на процессы кристаллизации, поскольку температура перехода от аморфного к кристаллическому состоянию составляет только половину значения температуры затвердевания жидкого полупроводника. Таким образом ситуация для кристаллитов, образующихся в жидкой фазе, значительно отличается от той, которая наблюдается для кристаллитов в аморфной матрице. А напряжение, возникающее при образовании зародышей кристаллической фазы в аморфной матрице, должно быть преодолено растущим кристаллитом. Это напряжение влияет на высоту барьера рассмотренного выше при обсуждении термодинамического подхода.

С целью уточнения факторов, влияющих на кристаллизацию и излучение морфологии аморфных пленок германия, в работе выполнен большой объем исследований по интервалу температуры подложки, в котором происходит кристаллизация, по изотермическому отжигу аморфной пленки германия, по использованию тонких подслоев аморфного углерода и его сочетания с изотермическим отжигом пленки германия. Кроме того проанализировано влияние электронного облучения на процесс кристаллизации при проведении исследований в электронных микроскопах.

Показано впервые, что температура подложки, при которой происходит процесс перехода аморфного состояния в кристаллическое, составляет $200 \pm 220^\circ\text{C}$ для термически напыленной тонкой пленки аморфного германия на подложках NiTi сколотых на атмосфере. С ростом температур подложки плотность и размер частиц кристаллической фазы растут. Размер и плотность частиц в первой стадии кристаллизации подтверждает упомянутую выше микрокристаллическую модель аморфного состояния. (см. табл.).

Изотермический отжиг аморфных пленок германия при температурах 350°C увеличивает плотность и размер частиц кристаллической фазы в зависимости от времени отжига, так как скорость роста при постоянной температуре является постоянной. Изотермический отжиг при температуре 350°C за время меньше одного часа не приводит к измеримым эффектам в рамках применяемых методов исследований и

Таблица

температура подложки, °C	средний размер частиц, нм	плотность частиц см ⁻³	доля кристаллической фазы %
225	4.47	1.61 · 10 ¹⁵	0.002
250	4.94	14.2 · 10 ¹⁵	0.09
275	6.17	28.3 · 10 ¹⁵	1.10
300	8.08	56.7 · 10 ¹⁵	1.56
325	9.67	79.2 · 10 ¹⁵	4.25
350	11.26	107 · 10 ¹⁵	7.99

его влиянием на кристаллизацию можно пренебречь. В условиях эксперимента не удалось выяснить, начинается ли процесс перехода от аморфного состояния к кристаллическому в объеме пленки или же на ее поверхностях. Эта проблема должна быть рассмотрена в связи с конкретным уровнем примесей в пленках, что кроме того еще определяет характер кристаллизации (гомогенный или гетерогенный). При термическом напылении аморфных пленок германия на скол (001) *NaCl* всегда наблюдается островковый характер тонкой пленки с декорированием поверхности подложки независимо от ее температуры. Эта характерная морфология сохраняется и при дальнейшем росте пленки. Чтобы улучшить морфологию пленки было предложено влиять на поверхность подложки скола (001) *NaCl* напылением тонкой пленки аморфного углерода толщиной 5-7 нм, покрывающей ступени скола и повышающей таким образом подвижность атомов германия на подложке. Кроме того, такой подслоем может повысить число центров зародышеобразования предшествующего росту пленки германия. Об этом можно судить по мере того, что образуется сплошная аморфная пленка германия даже при очень малых толщинах величиной 15 нм. Кроме изменения морфологии пленки подслоем углерода значительно повышает долю кристаллической фазы, что впервые обнаружено для тонких аморфных пленок. Доля кристаллической фазы растет от 0.33% для пленок напыленных при таких же условиях, но без подслоя углерода до 30.82% для пленок с углеродом. Такое резкое увеличение плотности и размеров частиц кристаллической фазы может быть связано с большим количеством предварительно сформировавшихся зародышей на подслоях углерода и с понижением температуры подложки, при которых наблюдается кристаллизация, до значений ниже 200°C. Предварительно сформировавшиеся зародыши могли образоваться на основе соединений германия с угле-

родом вблизи границы раздела, что дало бы процессу кристаллизации поверхностный характер.

Сочетание изотермического отжига с подслоями углерода приводит к образованию очень мелкодисперсных поликристаллических пленок германия с размером частиц меньше 40 нм.

Облучение электронным пучком в электронных микроскопах, использованных для структурных исследований, не влияют на процесс кристаллизации.

Глава 3. Выявлены различия между малыми частицами свободными и на подложке, а также малыми кристаллитами в матрице. Известно, что для малых частиц вклад поверхностной энергии в свободную энергию становится определяющим. Минимум свободной энергии частицы реализуется при минимальной поверхностной энергии для чего требуется, чтобы поверхность ее была наименьшей, то есть частица должна иметь форму близкую к сферической. Для частиц в матрице вместо поверхностной энергии следует рассматривать межфазную энергию поверхности раздела двух фаз. Следовательно и поверхностное натяжение для таких частиц не может играть ту же роль, как для свободных частиц или частиц на подложке. Форма кристаллита скорее всего определяется отличиями скоростей роста в разных направлениях и напряжением, действующим со стороны матрицы, на зародыши кристаллизации, что может привести к несферическим формам кристаллитов. При этом напряжения сжатия, имеющие место в начальной стадии перехода от аморфного к кристаллическому состоянию, уменьшаются в процессе кристаллизации и возникают напряжения растяжения [5], которые могут привести к пересечению образовавшихся во время роста частиц двойниковых границ. Несферические формы частиц обусловлены преобладающим ростом кристаллической фазы в направлении [211], что наблюдалось впервые для малых частиц германия в их аморфной матрице. В малых частицах с ГЦК решеткой часто встречается не свойственная массивному случаю симметрия пятого порядка. Такие частицы состоят из тетраэдров, ограненных наиболее плотноупакованными гранями типа (111), причем пять тетраэдров сложенных общим ребром дают десятигранник (декаэдр) и двадцать тетраэдров с общей вершиной образуют двадцатигранник (икосаэдр). Они удовлетворяют требованию минимальной поверхностной энергии и имеют форму близкую к сферической. В настоящей работе с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной мик-

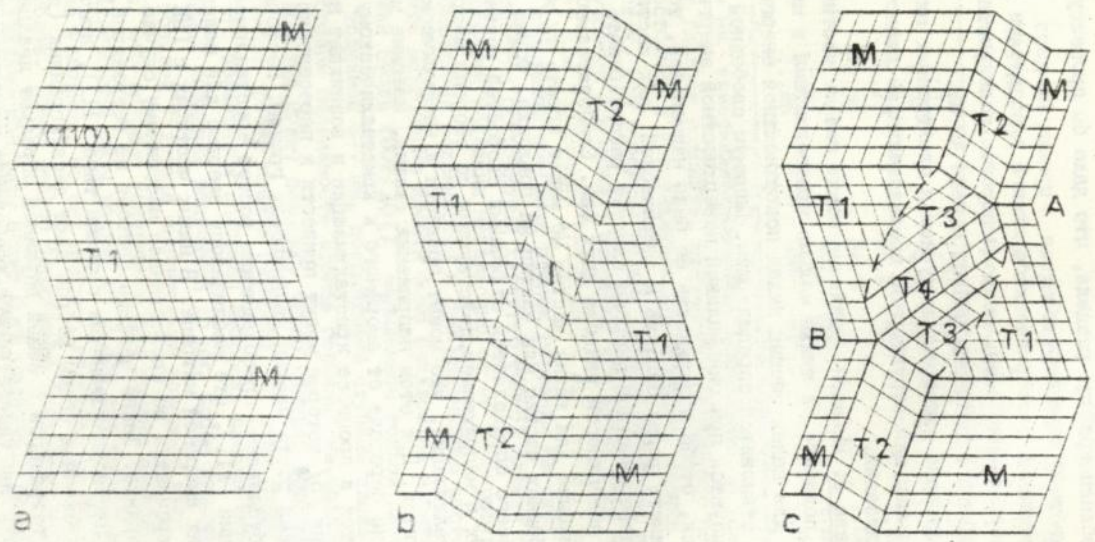


Рис. I

роскоши для кристаллитов германия в их аморфной матрице впервые доказано существование симметрии пятого порядка [2,4]. Однако формы таких частиц отличаются от сферической в силу уже отмеченных выше обстоятельств. Таким образом, причины образования частиц с симметрией пятого порядка более глубокие и разные механизмы ее формирования возможны. Автором диссертации наблюдались два механизма образования пятой симметрии: путем последовательного двойникования, известного у свободных декаэдрических и икосаэдрических частиц и путем пересечения двойниковых блоков под действием сил растяжений. Последний механизм можно описать следующей моделью.

Для того, чтобы объяснить происхождение наблюдаемых структур, предложен альтернативный механизм [4]. Причиной образования двойников могут выступать упругие напряжения, обусловленные различиями свободных энергий германия в аморфном и кристаллическом состояниях. Поэтому повторное двойникование не является неожиданным, так как микродвойники повсеместно зарождаются на аморфно-кристаллической поверхности раздела. Исходя из этих предварительных замечаний проанализирована область пересечения таких микродвойников, имеющих вид двойниковых полос (фрагмент кристаллической фазы ограниченный двумя параллельными двойниковыми границами).

Расположение первой двойниковой полосы (T1) сформировавшейся в аморфной матрице M, схематически представлено на рис. 1а. Здесь двойниковые границы проведены жирными линиями. Для простоты мы дали представление ГЦК решетки с ориентацией [110] перпендикулярной плоскости рисунка. Когда вторая двойниковая полоса (T2) пересекает первую (рис. 1б), то в области пересечения (I) происходит гомогенное (однородное) преобразование, которое фактически изменяет структуру решетки. Пунктирные линии здесь указывают переход от правильной к трансформированной решетке. Этот переход можно описать как субзернистую границу. Трансформированная решетка в области пересечения двойниковой полосы может затем преобразоваться в решетку с гексагональной структурой, как это было предложено для случая сильно деформированного кремния. В предлагаемой нами модели область I преобразуется иначе. С помощью дополнительно образующихся в ней двух параллельных двойниковых границ, а это приводит к появлению па-

параллельных двойниковых границ, а это приводит к появлению пары ориентированных друг к другу циклических двойников с симметрией пятого порядка. Удастся сохранить исходную структуру решетки и минимизировать длину субзеренных границ, показано на рис. 1с. Здесь ТЗ и Т4 обозначают третью и четвертую двойниковые ориентации, которые вместе с матрицей М формируют циклические двойники в точках А и В. Наиболее типичными дефектами обнаруженными в кристаллической фазе аморфных пленок германия являются двойниковые границы. Их большое количество свидетельствует о том, что в аморфных пленках германия они зарождаются и растут чаще всего. Это может быть связано с тем, что двойниковые границы занимают меньший удельный объем, чем другие дефекты. Во время роста дополнительные двойниковые границы могут образоваться на местах с ошибкой в упаковке, а последовательное двойникование может привести к случаю, когда образование пятой симметрии энергетически выгоднее чем образование межзеренной границы. Другие причины множественного двойникования в кристаллической фазе аморфного германия могут быть связаны с уже упоминавшимися напряжениями.

Также наблюдались между кристаллическими фрагментами, которые могут быть определены как еще не сформировавшиеся в процессе кристаллизации межзеренные границы, и дислокации обусловленные возникающими при этом напряжениями.

ВЫВОДЫ

1. Расширен круг исследованных воздействий, влияющих на переход от аморфного к кристаллическому состоянию в тонких пленках германия. Для термически напыленного германия на грань (001) NaCl, сколотую на атмосфере, на атмосфере, температура начала кристаллизации составляет 200-220°C, предварительное напыление тонких пленок углерода на подложку понижает температуру начала переходных процессов из аморфного в кристаллическое состояние, изменяет морфологию пленки германия (растет сплошная пленка, а не островковая), уменьшает размер критического зародка, а вместе с изотермическим отжигом при температуре 350°C приводит к образованию мелкодисперсной поликристаллической пленки, такой же отжиг при отсутствии подслоев углерода увеличивает размеры кристаллитов и их плот-

ность.

2. С помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии показано, что кристаллическая фаза в аморфных пленках германия растет в направлении типа $[211]$ и имеет текстуру в направлении типа $[110]$
3. Впервые показаны результаты электронно-микроскопических исследований с разрешением по решетке частиц кристаллической фазы в аморфных пленках германия, которые подтверждают симметрию пятого порядка в этих же частицах.
4. Показано, что основными дефектами в частицах германия являются двойниковые границы, малоугловые границы и субзеренные границы, а также краевые дислокации.
5. Предложена модель образования, симметрии пятого порядка, изложенная в настоящем автореферате на стр.]]

Цитируемая литература

1. R.F. Adamski; Effect of deposition parameters on the crystallinity of evaporated germanium films, J. Appl. Phys. vol. 40, N 11, 4301-4305 (1969);
2. V Bykov, H Hofmeister, T Junghanns and S Nepijko; Electron microscopic observation of fivefold symmetry in germanium particles crystallised in their amorphous matrix, Inst. Phys. Conf. Ser. N 117: Section 1 (Semicond. Mater. Conf., Oxford, 25-28 March 1991), 51-54;
3. K.P. Chick and P.K. Lim; Annealing and crystallization of amorphous Ge thin films, Thin Solid Films vol. 35, N 1, 45-56 (1976);
4. H. Hofmeister; A.F. Bardamid, T. Junghanns and S.A. Nepijko; Crystalline particles with multiply twinned structure in amorphous films of germanium, Thin Solid Films vol. 205, N 1, 20-24 (1991);
5. T.D. Nguyen in: G.W. Bailey (ed.), Proc. 49 EMSA Meeting, San Francisco Press Inc. San Francisco 1991, p. 182;
6. H. Sltu, Y. W. Lu and A.-L. Jung; Evidence for a non-thermal mechanism of order-disorder transformations in optical recording thin films, J. Non-Crystalline Solids 137 & 138, 1009-1012 (1991).

Основные результаты изложены в следующих работах:

1. H. Hofmeister, A.F. Bardamid, T. Junghanns and S.A. Nepijko; Crystalline particles with multiply twinned structure in amorphous films of germanium, Thin Solid Films vol. 205, N 1, 20-24 (1991);
2. V Bykov, H Hofmeister, T Junghanns and S Nepijko; Electron microscopic observation of five-fold symmetry in germanium particles crystallised in their amorphous matrix, Inst. Phys. Conf. Ser. N 117: Section 1 (Semicond. Mater. Conf., Oxford, 25-28 March 1991), 51-54;
3. H. Hofmeister and T. Junghanns; HREM - Characterization of Multiply-Twinned Particles in Amorphous Germanium in: J. Heydenreich and W. Neumann (eds.), Proc. 32. Course of the Int. Centre of Electron Microsc., Elbedruckerei Wittenberg, Halle 1992, 245-253;
4. H. Hofmeister, P. Werner and T. Junghanns: Fivefold Multiply-Twinned Crystallites in Vapour-Deposited Amorphous Thin Films of Germanium Studied by HREM in: P. Jena, S.N. Khanna and B.K. Rao (eds.) Proc. Int. Symp. on the Physics and Chemistry of Finite Systems: from Clusters to Crystal, NATO ASI Series, Kluwer Academic. Publ., Dordrecht 1992, vol. II, 1251-1256;
5. H. Hofmeister and T. Junghanns; Multiple Twinning in the Solid Phase Crystallization of Amorphous Germanium, Materials Science Forum 113-115, 631-636 (1992);
6. T. Junghanns and H. Hofmeister; The Effect of Substrate Conditions on the Formation



of Crystalline Particles in Amorphous Germanium Films, Materials Science Forum 113-115, 637-642 (1992);

7. H. Hofmeister and T. Junghanns, From Amorphous to Nanocrystalline Germanium - The Role of Twinning Studied by High Resolution Electron Microscopy, Submitted to. First International Conference on Nanostructure Materials in Cancun (Mexico) September 22 to 26, 1992.

ДИГАНС ТОРАЛЬФ

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ
ЧАСТИЦ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В АМОРФНЫХ
ПЛЕНКАХ ГЕРМАНИЯ**

Подписано в печать 12.01.93 г. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсетная 80 г/м². Офсетная печать. Усл.-печ.л.1.0
Уч.-изд.л.0.75. Тираж 100. Зак. № 2. Бесплатно

Институт физики АН Украины, ОНТИ,
252028, Киев-28, ГСП, проспект Науки, 46.

1900

1900

Av 26.697

Av 26.697

Бесплатно