



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ(21)(22) Заявка: **2007135977/28, 28.02.2006**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.02.2006

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
28.02.2005 US 60/657,208(43) Дата публикации заявки: **10.04.2009** Бюл. № 10(45) Опубликовано: **27.09.2012** Бюл. № 27

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **WO 96/22408 A, 25.07.1996. WO 01/65590 A, 07.09.2001. RUBIN M ET AL. P-TYPE GALLIUM NITRIDE BY REACTIVE ION-BEAM MOLECULAR BEAM EPITAXY WITH ION IMPLANTATION, DIFFUSION. OR COEVAPORATION OF MG. APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US, v.64, №1, 3 January 1994 (1994-01-03), p.64-66. LEI T FT AL. EPITAXIAL** (см. прод.)

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на национальной фазе: **28.09.2007**(86) Заявка РСТ:
IB 2006/000421 (28.02.2006)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2006/097804 (21.09.2006)

Адрес для переписки:
**127055, Москва, а/я 11, пат.пов.
Н.К.Попеленскому, рег. № 31**

(72) Автор(ы):

ФОН КЕНЕЛЬ Ганс (CH)

(73) Патентообладатель(и):

Зульцер Метко АГ (CH)

(54) СПОСОБ И УСТАНОВКА ДЛЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ТИПА III-V, УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ НИТРИДА МЕТАЛЛА, ЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРА НИТРИДА МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИК

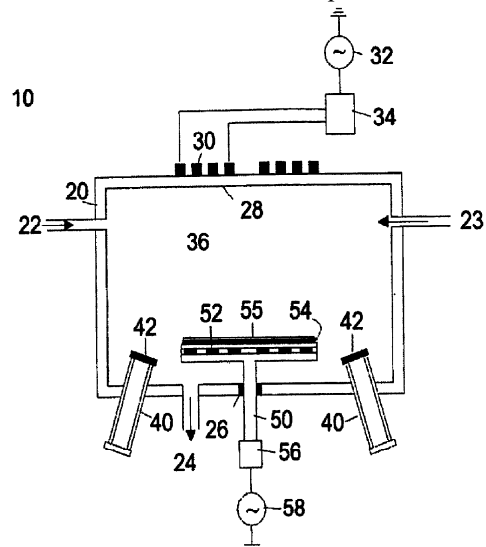
(57) Реферат:

Изобретение относится к установкам и способам эпитаксиального выращивания монокристаллов осаждением из паровой или газовой фазы. Сущность изобретения:

вакуумная установка для эпитаксиального выращивания полупроводников типа III-V содержит вакуумную камеру, в которой поддерживается давление от приблизительно 10^{-3} мбар до 1 мбар во время эпитаксиального

выращивания, размещенный в вакуумной камере подложкодержатель, установленный с возможностью закрепления и нагрева подложек, источники испарения веществ и ввода частиц пара в вакуумную камеру, которые являются частицами металлов в элементной форме, металлических сплавов и легирующих примесей, систему ввода и распределения газов в вакуумную камеру, источник подачи плазмы в вакуумную камеру, генератор магнитного поля для создания магнитного поля, позволяющего придать требуемую форму плазме в вакуумной камере. Вакуумная камера выполнена с возможностью осуществления в ней диффузного распространения частиц газов и паров металлов, активизации газов и паров металлов плазмой для вступления в реакцию и формирования однородного эпитаксиального слоя на нагретой подложке, прикрепленной к подложкодержателю посредством эпитаксии из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой. Данное

изобретение обеспечивает возможность получать эпитаксиальные слои с высокой скоростью, при низкой температуре, большой площади подложек и при отсутствии токсичных газов. 6 н. и 25 з.п. ф-лы, 6 ил.



Фиг.1

(56) (продолжение):

GROWTH OF ZINC BLENDE AND WURTZITIC GALLIUM NITRIDE THIN FILMS ON (001) SILICON. APPLIED PHYSICS LETTERS. AIP. AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US, v.59, №8.19 August 1991 (1991-08-19), p.944-946. RU 2244984 C, 20.01.2005.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21)(22) Application: **2007135977/28, 28.02.2006**(24) Effective date for property rights:
28.02.2006

Priority:

(30) Convention priority:
28.02.2005 US 60/657,208(43) Application published: **10.04.2009 Bull. 10**(45) Date of publication: **27.09.2012 Bull. 27**(85) Commencement of national phase: **28.09.2007**(86) PCT application:
IB 2006/000421 (28.02.2006)(87) PCT publication:
WO 2006/097804 (21.09.2006)

Mail address:

**127055, Moskva, a/ja 11, pat.pov.
N.K.Popelenskomu, reg. № 31**(72) Inventor(s):
FON KENEL' Gans (CH)(73) Proprietor(s):
Zul'tser Metko AG (CH)

(54) METHOD AND APPARATUS FOR EPITAXIAL GROWTH OF TYPE III-V SEMICONDUCTORS, APPARATUS FOR GENERATING LOW-TEMPERATURE HIGH-DENSITY PLASMA, EPITAXIAL METAL NITRIDE LAYER, EPITAXIAL METAL NITRIDE HETEROSTRUCTURE AND SEMICONDUCTOR

(57) Abstract:

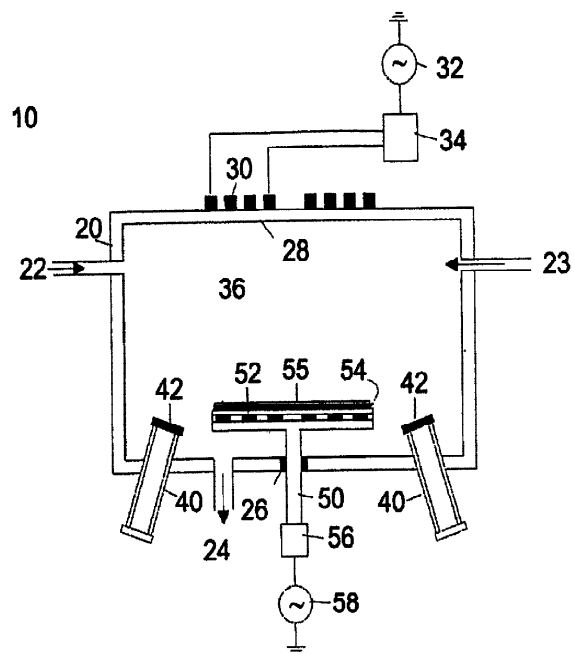
FIELD: chemistry.

SUBSTANCE: vacuum apparatus for epitaxial growth of type III-V semiconductors has a vacuum chamber in which pressure is kept in a range from approximately 10^{-3} mbar to 1 mbar during epitaxial growth, a substrate holder mounted in the vacuum chamber with possibility of attaching and heating substrates, sources for evaporating substances and feeding vapour particles into the vacuum chamber, which are particles of metals in elementary form, metal alloys and dopants, a system for feeding and distributing gases into the vacuum chamber, a source for feeding plasma into the vacuum chamber, a

magnetic field generator for creating a magnetic field which gives the plasma the required shape in the vacuum chamber. The vacuum chamber is adapted to conduct diffusive distribution of gas and metal vapour particles therein, activation of gases and metal vapour with the plasma for reaction and formation of a homogeneous epitaxial layer on the heated substrate attached to the substrate holder via gaseous-phase epitaxy, activated by the low-temperature plasma.

EFFECT: possibility of obtaining epitaxial layers at a high rate, at low temperature, large surface area of substrates and without toxic gases.

31 cl, 6 dwg



Фиг.1

RU 2 4 6 2 7 8 6 C 2

RU 2 4 6 2 7 8 6 C 2

Область техники, к которой относится изобретение

Данное изобретение относится к способам эпитаксиального выращивания слоев и к установкам для нанесения эпитаксиальных слоев. Более конкретно данное изобретение относится к установкам и способам эпитаксиального выращивания

5 монокристаллов осаждением непосредственно из паровой, или газовой, фазы.

Уровень техники

Полупроводниковое соединение нитрид галлия (GaN), принадлежащее типу III-V, а также его сплавы с алюминием (Al) и индием (In) являются идеальными материалами

10 для применения в электронике высоких частот и больших мощностей (см., например, публикацию Brown et al., "Solid-State El.", 46, 1535 (2002), содержание которой включено посредством ссылки). Эти материалы идеальны также для создания светоизлучающих диодов коротковолнового диапазона и лазеров (см., например,

15 публикации Nakamura, "Annu. Rev. Mater. Sci.", 28, 125 (1998); Nakamura, "Science", 281, 956 (1998) и Smith et al., J. Appl. Phys., 95, 8247 (2004), содержание которых включается посредством ссылок).

Одним из основных недостатков указанного материала является, однако, отсутствие или редкость среди получаемых кристаллов монокристаллов большого

20 размера, что обусловлено экстремально высокими значениями температуры и давления, которые требуются для формирования кристаллов значительных размеров. Единственным способом получения пластин GaN большого размера является гетероэпитаксия, при которой слои GaN, имеющие значительную толщину и поэтому не нуждающиеся, как таковые, в подложке, выращиваются на подложке, состоящей,

25 например, из сапфира или карбида кремния (SiC), которая затем удаляется. Более тонкие слои нитридов типа III-V, полученные гетероэпитаксией, могут применяться в полупроводниковых приборах без удаления подложки.

Типичной проблемой, характерной для всех способов гетероэпитаксиального

30 выращивания GaN, является высокая концентрация дислокации, изначально присущая растущим слоям. Эта проблема связана с различиями в параметрах кристаллических решеток GaN и доступных материалов для подложек, таких как сапфир, карбид кремния и кремний (см., например, публикацию Dadgar et al., Phys. Stat. Sol. (c) 0, 1583 (2003), содержание которой включается посредством ссылки). Вследствие

35 высокой концентрации дислокации несоответствия слои GaN, полученные гетероэпитаксией, обычно характеризуются также и высокой концентрацией пронизывающих дислокаций, которые со временем ухудшают функциональные характеристики приборов, по мере того как дислокации проникают в активные слои. Было предложено много способов снижения концентрации пронизывающих

40 дислокаций до значений, приемлемых для полупроводниковых приборов, - например, выращивание различного рода буферных слоев и латеральное зарощивание с применением или без применения масок (см., например, публикацию Davis et al., Proc. IEEE, 90, 993 (2002), содержание которой включается посредством ссылки).

45 Основными способами, применяемыми для выращивания эпитаксиальных слоев нитридов типа III-V, являются гидридная эпитаксия из газовой фазы (HVPE), металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы (MOCVD) и молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE). При способе HVPE в качестве исходных материалов для

50 получения осаждаемых газообразных веществ используются чистые металлы, которые переносятся в форме газообразных галогенидов в область реакции, где они реагируют с азотосодержащим газом (обычно NH_3), в результате чего на подложке, нагреваемой обычно до температур, превышающих 1000°C , формируется эпитаксиальный слой.

Преимуществом способа HVPE является очень высокая скорость роста, достигающая 100 мкм/ч (см., например, патент US No. 6,472,300, полученный Николаевым и др., содержание которого включается посредством ссылки). Благодаря высокой скорости роста, присущей HVPE, этот способ применяется в основном для

5 выращивания слоев, толщина которых составляет много десятков микрон и, в частности, для получения слоев, не требующих подложки, и используемых в качестве подложек для последующих этапов выращивания, на которых применяются способы MOCVD или MBE.

10 Однако для способа HVPE оказывается более трудным обеспечить наращивание пленок с низкой скоростью и с возможностью управления степенью резкости границ между слоями; для такого управления может потребоваться механическое перемещение подложки между областями протекания реакции (см. например, патент US No. 6,706,119, полученный Цветковым и др., содержание которого

15 включается посредством ссылки). Кроме того, присутствие газообразного водорода в области реакции делает необходимым отжиг подложки в атмосфере инертного газа, особенно если требуется получить высокую степень легирования акцепторными примесями, например примесями Mg (см., например, патент US No. 6,472,300, полученный Николаевым и др., содержание которого включается посредством

20 ссылки).

Способ MOCVD, или MOVPE, если вместо термина "осаждение" используется термин "эпитаксия", представляет собой разновидность химического осаждения из газовой фазы, в которой металлические реагенты используются совместно с другими

25 химически активными газами, содержащими анионы, такими как аммиак, используемый при выращивании кристаллов нитридов. Существенными недостатками MOCVD являются необходимость применения дорогостоящих газообразных исходных материалов и довольно низкая скорость роста, составляющая

30 лишь несколько мкм/ч. Кроме того, при гетероэпитаксии GaN на сапфире, SiC или Si обычно необходимо перед выращиванием активных слоев (которое проводится при температурах, превосходящих 1000°C) вырастить при более низкой температуре подложки буферный слой (см., например, патент US No. 6,818,061, полученный Peczalski и др., содержание которого включается посредством ссылки).

35 Тем не менее техника MOCVD является наиболее часто используемой при выращивании структур активных слоев, удовлетворяющих требованиям производства полупроводниковых приборов (см., например, публикации Wang et al., Appl. Phys. Lett., 74, 3531 (1999) и Nakamura, Science, 281, 956 (1998), содержание которых

40 включается посредством ссылок).

Значительные различия между значениями коэффициентов теплового расширения типичных подложек и слоев GaN в сочетании с высокой температурой подложек при наращивании слоев в значительной мере препятствуют получению эпитаксиальных

45 слоев, свободных от трещин. Для предотвращения возникновения трещин, как представляется, необходимо выращивать промежуточные слои весьма сложной структуры (см., например, публикацию Blasing et al., Appl. Phys. Lett. 81, 2722 (2002), содержание которой включается посредством ссылки). Как HVPE, так и MOCVD являются способами осаждения, реализуемыми при атмосферном давлении или при

50 небольшом разрежении. Геометрия реактора и конфигурация газовых потоков весьма сильно влияют на степень однородности слоев. Напротив, способ MBE осуществляется при степени разрежения, находящейся в диапазоне от высокого вакуума до сверхвысокого вакуума, а поэтому средняя длина свободного пробега

частиц значительно превышает размеры реактора. Металлы испаряются в так называемых испарительных, или эффузионных (с медленным истечением паров), ячейках, из которых пучки молекул или атомов направляются к нагретой подложке, не испытывая рассеивания в газе. При выращивании слоев нитридов должен
 5 использоваться источник азота, от которого поступает активированный азот. Активация обычно производится с помощью плазменного возбуждения молекулярного азота. Система, предназначенная для эпитаксиального выращивания слоев нитрида галлия, имеющая дистанцированный источник подачи плазмы
 10 (служащей для активации азота), в котором применяется электронный циклотронный резонанс (ECR), была описана, например, в патенте US No. 5,633,192, полученном Moustakas и др., содержание которого включается посредством ссылки. Так как источник галлия (Ga) обычно представляют собой эффузионные ячейки, способ MBE не требует дорогостоящих металлоорганических исходных материалов,
 15 которые обычно требуются для способа MOCVD. Способ MBE, кроме того, предоставляет прекрасную возможность управлять составом слоев и степенью резкости границ между слоями (см., например, публикацию Elsass et al., Jpn. J. Appl. Phys. 39, L1023 (2000), 023 (2000), содержание которой включается посредством
 20 ссылки). Но в связи с низкими скоростями роста, порядок которых равен 1 мкм/ч, и сложностью оборудования, считается, что этот способ не применим для крупномасштабного производства полупроводниковых гетероструктур.

Еще одним способом, потенциально пригодным для крупномасштабного производства нитридных полупроводников (см., например, патент US No. 6,454,855,
 25 полученный von Kanel et al., содержание которого включается посредством ссылки), является химическое осаждение из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой (LEPECVD). В отличие от способа MBE, дополненного применением плазмы, в котором активация азота осуществляется дистанцированным источником подачи
 30 плазмы, в способе LEPECVD плотная низкотемпературная плазма находится в прямом контакте с поверхностью подложки. Низкотемпературная плазма генерируется дуговым разрядом постоянного тока, который активирует металлоорганические исходные материалы и азот (см., например, патент US No. 6,918,352, полученный von Kanel et al., содержание которого включается посредством
 35 ссылки). Скорости роста при способе LEPECVD потенциально могут достигать скоростей роста, сопоставимых со скоростями роста при способе HVPE (несколько десятков мкм/ч), и при этом возможно осуществлять такое оптимальное управление динамическим диапазоном скоростей роста, что достигается совершенство границ
 40 между слоями. Кроме того, так как активация исходных реагентов с помощью плазмы происходит быстрее, чем термическая активация, следует ожидать, что способ может выполняться при менее высоких температурах подложек. Применяемый при способе LEPECVD источник подачи плазмы, или плазмотрон, работающий на
 45 постоянном токе, как было показано, может иметь размеры, позволяющие выполнять способ в масштабах, достаточных для обработки подложек диаметром до 300 мм (см., например, заявку WO 2006/000846, принадлежащую von Kanel et al., содержание которой включается посредством ссылки).

Хотя термин "LEPECVD" был введен применительно к дуговому разряду постоянного тока (см. публикацию Rosenblad et al., J. Vac. Sci. Technol. A 16, 2785 (1998),
 50 содержание которой включается посредством ссылки), дуговой разряд постоянного тока является не единственным способом генерации низкотемпературной плазмы, применимой для эпитаксии. Согласно известному техническому уровню ионы,

имеющие достаточно низкую энергию, чтобы участвовать в процессе эпитаксии, можно также получать с помощью источников подачи плазмы, использующих электронный циклотронный резонанс (ECR) (см. публикацию Heung-Sik Tae et al., Appl. Phys. Lett. 64, 1021 (1994), содержание которой включается посредством ссылки).

5 Источники подачи плазмы на основе ECR (далее - "ECR-плазмотрон"), потенциально применимый для осаждения из газовой фазы, активированной плазмой, на подложках большой площади, был описан, например, в патенте US No 5,580,420, полученном Katsuya Watanabe и др., содержание которого включается посредством
10 ссылки. Однако в промышленном производстве полупроводников мощные ECR-плазмотроны применяются в большей мере для травления, чем для эпитаксии. Очень высокие скорости травления были достигнуты для нитридов типа III-V (см., например, публикацию Vartuli et al., Appl. Phys. Lett., 69, 1426 (1996), содержание которой
15 включается посредством ссылки). Другими источниками подачи низкотемпературной плазмы высокой плотности могут служить индуктивно-связанные источники подачи плазмы (далее - "ICP-плазмотроны"), Такие плазмотроны имеют ряд преимуществ перед ECR-плазмотронами, - например, более простым оказывается увеличение
20 размеров системы с целью обработки пластин большого диаметра; меньше их стоимость. Обзор различных ICP-плазмотронов дан в публикации Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol., 1, 109 (1992), содержание которой включается посредством ссылки. Наиболее распространенными источниками подачи плазмы для плазменной обработки являются элементы индукционной связи (далее - "индукторы") с винтовой
25 намоткой, витки которых обвиваются вокруг емкости, в которой генерируется плазма (см., например, патент Steinbergetal., US No. 4,368,092, содержание которого включено посредством ссылки), и спиральные индукторы с плоской спиральной намоткой (см., например, патент US No. 4,948,458, полученный Ogle, содержание
30 которого включается посредством ссылки). Источники подачи плазмы, в которых применяются спиральные индукторы, обладают преимуществом, состоящим в более высокой однородности плазмы, что облегчает создание установок для работы с подложками большого размера (см., например, публикацию Collison et al., J. Vac. Sci. Technol., A 16, 100 (1998), содержание которой включается посредством ссылки).
35 Хотя ICP-плазмотроны обычно работают при частоте 13,56 МГц, было показано, что при меньшей рабочей частоте ослабляется емкостная связь, благодаря чему происходит дальнейшее снижение энергии ионов (см. патент US No. 5,783,101, полученный Ma et al., содержание которого включается посредством ссылки).

Как ECR-плазмотроны, так и ICP-плазмотроны часто применяются для травления.
40 Для GaN очень высокие скорости травления наблюдались также при использовании ICP-плазмотронов (см. публикацию Shul et al., Appl. Phys. Lett. 69, 1119 (1996), содержание которой включается посредством ссылки). Но для эпитаксиального выращивания материалов полупроводникового качества эти источники подачи плазмы применяются редко. Недавно было предложено
45 использовать электрически экранированный ICP-плазмотрон для ионного эпитаксиального выращивания слоев кремния. Этот способ имеет очевидный недостаток, состоящий в необходимости устанавливать металлический коллиматор внутри вакуумной камеры (см. патент US No. 6,811,611, полученный Johnson, содержание которого включается посредством ссылки).
50

ICP-плазмотроны могут также применяться для эффективной очистки камер для выращивания слоев, например, камер для способа термохимического осаждения из газовой фазы, в котором обычно применяется дистанцированный плазмотрон (см.

патент US No. 5,788,799, полученный Steger, содержание которого включается посредством ссылки). Очистка вакуумных камер особенно важна при производстве полупроводников, в котором концентрация посторонних макрочастиц должна поддерживаться настолько низкой, насколько возможно. Для камер технологической обработки, снабженных источником подачи плазмы, например ICP-плазмотроном, 5 разумеется, не нужен какой-либо дополнительный дистанцированный источник для эффективной очистки (см. патент US No. 6,992,011, полученный Nemoto и др., содержание которого включается посредством ссылки). Какой бы источник подачи плазмы ни применялся для получения низкотемпературной плазмы в способе химического осаждения из газовой фазы, активированной плазмой, если такой источник применяется при выращивании полупроводниковых соединений типа III-V, то, скорее всего, концентрация включаемого в растущие слои углерода окажется 10 намного большей, чем при использовании способа MOCVD.

Включение углерода является следствием использования органических исходных материалов при способе MOCVD, и, как можно предположить, это же будет справедливо и по отношению к способу LEPECVD (см. патент US No. 6,454,855, 15 полученный Kanel и др., содержание которого включается посредством ссылки).

Применение высокоактивной плазмы для расщепления молекул исходных соединений в способе LEPECVD, как можно ожидать, сильно увеличит нежелательное включение углерода (возможно, до такой степени, которая недопустима для полупроводниковых приборов данного назначения), поскольку углерод проявляет себя как легирующая примесь (см., например, публикацию Green et al., J. Appl. Phys., 95, 8456 (2004), 20 содержание которой включается посредством ссылки).

Цель данного изобретения - избежать недостатков, характерных для указанных выше технологий, относящихся к предшествующему техническому уровню, - таких недостатков, как поглощение углерода и водорода, высокие температуры подложек и 30 низкие скорости наращивания слоев. Еще одним важнейшим ограничением для способов, относящихся к предшествующему техническому уровню, является сравнительно небольшой размер пластин (два дюйма (50,8 мм) при промышленном производстве и, как было показано, до 6 дюймов (152,4 мм) для сапфировых подложек). Увеличение размеров обрабатываемых кремниевых пластин до 300 мм (и 35 более) является одной из целей данного изобретения.

Раскрытие изобретения

Данное изобретение предлагает новую установку и способ, в которых применяется низкотемпературная плазма высокой плотности, для эпитаксиального выращивания с 40 высокой скоростью слоев полупроводниковых соединений на полупроводниковой подложке. Изобретение дает возможность наращивать слои весьма разнообразного состава, так как позволяет управлять составом компонент и/или их концентрациями в способе наращивания. Первая операция способа состоит в том, что один или несколько металлов подвергаются испарению, и пары металлов инжектируются во 45 внутреннее пространство вакуумной камеры осаждения (далее - "вакуумная камера") установки. Испарение может производиться, например, с помощью эффузионных ячеек или мишеней для распыления, или испарения, сообщаемых с внутренним пространством вакуумной камеры. Параллельно с инжекцией в вакуумную камеру паров металлов или металла (например, галлия) в вакуумную камеру инжектируется 50 также неметаллический газ, как правило, являющийся инертным нетоксичным газом (например, азотом в форме N₂). Вторая операция, протекающая, по существу, одновременно с первой, состоит в том, что в вакуумной камере создается и

поддерживается плотная низкотемпературная плазма, получаемая любым из многих способов генерации плазмы (такова, например, плазма электронного циклотронного резонанса (ECR), плазма ICP-плазмотрона или плазма дугового плазмотрона постоянного тока). Когда неметаллический газ полностью поглощается плазмой, он становится высокоактивным и реагирует с газообразными металлами, формируя эпитаксиальный полупроводниковый слой (например, GaN) на нагретом полупроводниковом подложке, удерживаемом в плазме. Изобретение предлагает способ, в котором не участвует углерод (поскольку не требуются органические исходные материалы), особенно хорошо подходящий для выращивания полупроводниковых слоев на кремниевых подложках большой площади. Кроме того, если не применяются какие-либо токсичные газообразные компоненты, как транспортные, так и реактивные, то способ является в высокой степени экологически чистым.

Краткое описание чертежей

На фиг.1 представлен схематический вид сбоку системы для эпитаксии из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой (LEPEVPE); система включает ICP-плазмотрон и эффузионные ячейки.

На фиг.2 схематически изображен слой, наращиваемый на подложке, подвергнутому воздействию низкотемпературной плазмы.

На фиг.3 представлен схематический вид плазменного объема удерживаемой магнитным полем плазмы.

На фиг.4 представлен схематический вид сбоку варианта системы для способа LEPEVPE, включающей ICP-плазмотрон и эффузионные ячейки, причем подложка направлена поверхностью роста вниз.

На фиг.5 представлен схематический вид сбоку системы для способа LEPEVPE, включающей ICP-плазмотрон и источники распыления.

На фиг.6 дано схематическое изображение реализующей способ LEPEVPE системы, соответствующей данному изобретению, включающей дуговой плазмотрон постоянного тока и эффузионные ячейки.

Осуществление изобретения

Данное изобретение предлагает установку, а также устройство и способ, предназначенные для эпитаксиального выращивания полупроводников типа III-V, в частности нитридов группы III, таких как GaN, GaAlN, и GaInN. В устройстве генерируется низкотемпературная плазма высокой плотности, используемая в способе эпитаксии на полупроводниковой подложке полупроводниковых слоев осаждением из газовой фазы, активированной плазмой. Данная система позволяет экономически эффективно получать гетероструктуры, применимые в мощных высокочастотных усилителях, осветительных светодиодах, генерирующих фиолетовый, синий и белый свет, и полупроводниковых лазерах, генерирующих свет в синем и ультрафиолетовом диапазонах.

Обратимся теперь к фиг.1, где представлено устройство 10, в котором имеется вакуумная камера 20, имеющая внутреннее пространство 21, которое сообщается с системой вакуумной откачки (не показана), - например, системой, включающей турбомолекулярный вакуумный насос, - соединенной с выходной линией 24.

Вакуумная камера 20 и система вакуумной откачки выбираются такими, чтобы были удовлетворены требования сверхвысокой чистоты, предъявляемые производством полупроводников. Было найдено, например, что таким требованиям удовлетворяет система, позволяющая получать (при отсутствии технологических газов)

сверхвысокий вакуум. Инертные или нереакционноспособные при нормальных условиях газы, такие как аргон и азот, а также любые дополнительные газы, требуемые для протекания способа, поступают в вакуумную камеру 20 через средства 22 для ввода газов. Азот в форме N_2 при обычных условиях является инертным. Но под воздействием плазменного поля данного средства молекулярный азот N_2 превращается в атомарный азот (N) и становится высокоактивным и реакционноспособным. Вакуумная камера 20 имеет диэлектрическое окно 28, через которое электромагнитные волны высокочастотного диапазона (далее - "ВЧ") от блока спирального индуктора проступают во внутреннее пространство 21 вакуумной камеры 20. Блок 30 спирального индуктора соединен с цепью 32 согласования сопротивления и ВЧ-генератором 34. Электромагнитные волны ВЧ-диапазона, излучаемые спиральными витками индуктора, генерируют плотную низкотемпературную плазму во внутреннем пространстве 21 камеры 20. Так, например, показано, что ICP-плазмотрон "ICP-P 200", предлагаемый компанией JE PlasmaConsult, GmbH (г. Вупперталь, Германия), производит ионы аргона и азота с энергиями ниже 20 эВ, если он применяется при давлении в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-2} мбар и при мощности до 1 киловатта.

Блок 50 выращивания электрически изолирован от вакуумной камеры 20 с помощью изоляторов 26. Одна или несколько подложек 54 нагреваются с обратной стороны нагревателем 52, например омическим нагревателем или ламповыми нагревателями. Подложка 54 находится дальше от области самой высокой плотности плазмы, находящейся вблизи диэлектрического окна 28, - а именно дальше на расстояние, равное нескольким значениям глубины поверхностного слоя, обычно на 5-20 таких значений. Глубина поверхностного слоя составляет (по порядку величины) 1 см при типичных для данного изобретения значениях рабочего давления. Блок 50 выращивания может быть заземлен, но его потенциал может также оставаться "плавающим". Альтернативно, блок 50 выращивания может быть соединен с источником постоянного тока, обеспечивающим электрическое смещение, или может быть соединен через цепь 56 согласования сопротивления с ВЧ-генератором 58, благодаря чему будет происходить автоматическое смещение постоянного тока. Эти средства применяются для управления разностью потенциалов между подложками 54 и плазмой. Эти средства обеспечивают, что электрическая составляющая электромагнитного поля, перпендикулярная поверхности подложек 54, может регулироваться независимо от параметров, управляющих генерацией плазмы 36. Таким образом, энергию ионов, сталкивающихся с подложкой, можно регулировать, создавая оптимальные условия эпитаксии.

Кроме того, вакуумная камера 20 имеет один или несколько эмиттеров 40 паров металлов (в воплощении, взятом в качестве иллюстрации, ими являются эффузионные ячейки), которые могут испарять металлы, - например, Ga, In и Al, - и инжектировать пары металлов во внутреннее пространство 21 камеры. Для подобных металлов температура эффузионных ячеек, обычно применяемых в молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ), может быть легко установлена такой, что будут достигаться намного более высокие скорости испарения, чем обычные для этой технологии. Например, было найдено, что увеличение температуры эффузионной ячейки, испаряющей галлий, на 200°C оказывается достаточным для увеличения скорости нарастания слоя GaAs в 100 раз по сравнению со скоростью, типичной для способа МВЕ и составляющей 1 монослой/с. Как и для способа МВЕ, возможно управлять быстроедействующими заслонками 42 так, чтобы полностью перекрывать потоки

паров от эмиттеров 40.

При эпитаксиальном осаждении мощность ВЧ-колебаний, подаваемых на индуктор 30, и давление газа в вакуумной камере 20 выбираются такими, что нагретые подложки 54 в полной мере подвергаются воздействию низкотемпературной плазмы.

Обычно давление газа в вакуумной камере 20 лежит в диапазоне от 10^{-4} мбар до 1,0 мбар, а наиболее типичными являются значения в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-1} мбар. При таких условиях перенос в плазме как активированного азота, так и паров металлов, поступающих от эффузионных ячеек 40, является диффузионным. Атомы металлов, реагируя с азотом, формируют эпитаксиальные слои нитридов на нагретых подложках 54.

Обратимся теперь к фиг.2, где в деталях показан слой 55, выращиваемый на подложке 54, подвергаемой воздействию низкотемпературной плазмы 36. Плотность ионов плазмы экспоненциально убывает при удалении от диэлектрического окна 28 и приближении к подложке 54. Однако, например, для плазмотрона "ICP-P 200" плотность ионов азота в плазме может все еще превышать 10^{11} см⁻³ вблизи подложки, расположенной примерно на 10 см ниже диэлектрического окна 28, когда давление азота равно 10^{-1} мбар, интенсивность потока газа составляет 10 см³/мин, а мощность ВЧ-колебаний равна 1000 Вт. Для того чтобы значения энергии ионов оставались низкими, может оказаться полезным поддерживать полное давление газов постоянным, - например, вблизи значения 10^{-1} мбар, - обеспечивая поступление в вакуумную камеру через средство 22 ввода газов, наряду с газообразным азотом, регулируемого потока аргона, если парциальное давление азота выбирается существенно меньшим, чем 10^{-1} мбар.

Благодаря эффективной активации реагентов в плотной плазме 36 и интенсивной бомбардировке поверхности подложки 54 ионами низкой энергии температура подложки может быть существенно понижена по сравнению с температурами, составляющими 1000°C и более, которые типичны для способа MOCVD. Поэтому можно ожидать, что значительно уменьшатся трудности, связанные с растрескиванием слоев, обусловленном различием коэффициентов теплового расширения наращиваемых слоев и типичных подложек (из сапфира, карбида кремния и кремния).

Обратимся теперь к фиг.3, на которой показана в деталях область вакуумной камеры 20, которая оборудована (но это не является обязательным) катушками или постоянными магнитами 70, служащими для удержания плазмы 36, а также для увеличения ее плотности и придания ей большей равномерности. Магнитное поле, создаваемое этими катушками или постоянными магнитами, помогает придать требуемую форму плазменному объему. Даже слабые поля, составляющие (по порядку величины) от 10^{-3} до 10^{-2} тесла, считаются дающими благоприятный эффект.

В предпочтительном воплощении изобретения при эпитаксиальном выращивании нитридных полупроводников совершенно не применяются химически активные газы. В дополнительных ячейках 40а могут помещаться различные легирующие примеси, которые предпочтительно применять в виде элементов, например, металлы (Mg, Zn и т.п.), проявляющие себя как акцепторные примеси. Точно так же с помощью дополнительных ячеек 40а могут вводиться легирующие вещества, ведущие себя как донорные примеси, например кремний. Такие эмиттеры (эффузионные ячейки) 40а также оснащаются быстродействующими затворами 42, позволяющими быстро и полностью перекрывать потоки легирующих примесей. Для того чтобы иметь

возможность обработки пластин размером до 300 мм (и, потенциально, больших размеров), предпочтительно, чтобы в качестве материала для подложек 54 использовался кремний. Но с помощью нового способа, соответствующего изобретению, возможна также обработка подложек других типов, применяемых в

Ранее никем не предлагалось сочетать применение эффузионных ячеек для распыления металлов с применением плотной низкотемпературной плазмы для эпитаксиального наращивания слоев. Мы называем новый способ "эпитаксией из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой" (LEPEVPE). Способ LEPEVPE осуществляется при совершенно других условиях, чем условия во всех известных способах, включая способ LEPECVD, при котором для генерации плазмы применяется разряд постоянного тока, а исходные материалы являются химически активными газами.

В одном воплощении изобретения область эмиттеров 300 паров имеет изолированную систему вакуумной откачки (320 на фиг.6), благодаря чему исключаются термические реакции с нагретыми до высоких температур металлами внутри камеры и диффузионный транспорт по соединительной трубке к вакуумной камере. В предпочтительном воплощении изобретения для каждого из испаряемых металлов предусмотрены несколько эмиттеров (эффузионных ячеек) 40 и 40а. Каждая ячейка может иметь свою рабочую температуру, что позволяет легко осуществлять быстрое изменение скорости роста и концентраций легирующих примесей переключением активности с одной ячейки на другую.

В другом воплощении изобретения применяются дополнительные подводящие газ линии 23, которые обеспечивают поступление в вакуумную камеру в газообразной форме таких легирующих элементов, которые предпочтительно применять в газообразной форме. Предпочтительно, чтобы легирующие примеси в газообразной форме, такие как кремневодород, применяемый как донорная примесь, были разбавлены инертным газом, например аргоном. Динамический диапазон характеристик легирования может быть расширен, если для введения одной легирующей примеси в газообразной форме использовать более чем одну подводящую газ линию. В предпочтительном воплощении, в котором эмиттеры 40а содержат только твердотельные источники легирующих примесей, способ осуществляется без участия водорода. Такое воплощение особенно предпочтительно при выращивании р-легированных слоев GaN, так как способ, в котором не участвует водород, не требует никакой активации легирующей примеси тепловым отжигом. Способ, соответствующий изобретению, осуществляется в отсутствие углерода, так как не требует никаких углеродосодержащих газообразных исходных веществ.

В предпочтительном воплощении изобретения, которое иллюстрирует фиг.1, блок подложек 54 ориентирован поверхностью роста вверх. Такая конфигурация, обычно применяемая при изготовлении полупроводников, облегчает обработку пластин и упрощает конструкцию блока выращивания или подложкодержателя 50. Согласно изобретению способ LEPEVPE отличается тем, что низкотемпературная плазма высокой плотности находится в прямом контакте с поверхностью подложки 54. Поверхность подложки 54, следовательно, подвергается интенсивной бомбардировке низкоэнергетическими ионами, энергия которых может регулироваться соответствующим выбором потенциала смещения подложки. В этом состоит четкое отличие данного способа от способов плазменной обработки, использующих дистанцированные источники подачи плазмы, которые обычно дают только

радикалы, тогда как плотности ионов на поверхности подложки пренебрежимо малы. Интенсивная бомбардировка подложки низкоэнергетическими ионами, как было показано, дает преимущества при эпитаксиальном выращивании слоев, предназначенных для качественных полупроводниковых приборов, при экстремально
 5 высоких скоростях роста, превышающих 5 нм/с и низких температурах подложки - столь низких, как, например, 500°C (см., например, публикацию von Kanel et al., Appl. Phys. Lett. 80, 2922 (2002), содержание которой включается посредством ссылки). Таким образом, согласно изобретению, можно ожидать, что очень высокая
 10 производительность будет достигаться, если сочетать способ LEPEVPE с отвечающими современному техническому уровню инструментальными средствами (не показаны) обработки пластин.

Согласно данному изобретению устройство 10 может применяться для выращивания эпитаксиальных полупроводников III-V, в особенности - для
 15 выращивания нитридов элементов III группы на специально обработанных монокристаллических подложках 54. Возможные способы обработки поверхности подложек 54 могут включать отвечающие современному уровню техники способы предварительной химической очистки, термической или плазменной очистки,
 20 выполняемой *in situ* и сопровождаемой формированием *in situ* шаблонов для выращивания, например, состоящих из окислов, карбидов или осаждаемых при низких температурах нитридов, а далее применяемых для эпитаксиального наращивания на них полупроводниковых слоев нитридов.

Обратимся теперь к фиг.4, на которой показана устройство 10 предлагаемой
 25 установки, где подложка 54, на которую производится осаждение, установлена на плате подложкодержателя 50 во внутреннем пространстве 21 камеры, причем подложки теперь ориентированы поверхностями роста вниз. При такой конфигурации возникает меньше трудностей, связанных с загрязнением макрочастицами, но
 30 требуется усложнение системы обработки пластин и конструкции подложкодержателя 50. Как отмечено выше, вакуумная камера 20 может быть (но это не обязательно) оснащена катушками индуктивности или постоянными магнитами, которые могут служить для придания нужной формы плазменному объему, и камера может быть оснащена эффузионными ячейками 40 и т.д., аналогично сказанному
 35 выше.

Обратимся теперь к фиг.5, на которой показано другое воплощение изобретения, где подложки 54, установленные в блоке выращивания 50 внутри камеры 20, как и
 40 выше, ориентированы поверхностями роста вниз. Вакуумная камера 20 может быть (но это не обязательно) оснащена катушками индуктивности или постоянными магнитами, которые могут служить для придания плазменному объему требуемой формы (см. фиг.3).

В этом воплощении пары металлов, представленных элементами, вводятся в плазму с помощью охлаждаемых водой источников 62 распыления, удерживающих мишени 60
 45 для распыления. Желательно, чтобы мишени 60 для распыления были расположены как концентрические кольца или кольцевые сегменты вокруг диэлектрического окна 28 ICP-плазмотрона. Мишени для распыления соединены через блок 64 согласования сопротивления с блоком 66 питания ВЧ, который обеспечивает подачу
 50 периодически изменяющегося напряжения ВЧ; предпочтительно, чтобы его частота существенно отличалась от частоты генератора 34, служащего для питания катушек 30 ICP-плазмотрона. Это ослабляет нежелательную интерференцию между двумя видами источников питания - 34 и 66. В другом воплощении изобретения

источники 62 распыления получают питание от блока питания постоянного тока. Показано, что для типичных значений произведения расстояния на давление, имеющих порядок $0,2 \cdot 10^{-2}$ мбар·м термализация (уменьшение кинетической энергии) испаренных частиц, достигающих подложки, является почти полной, позволяющей
 5 применять источники распыления при выращивании материалов полупроводникового качества (см., например, публикацию Sutler et al., Appl. Phys. Lett., 67, 3954 (1995), содержание которой включается посредством ссылки). Чтобы обеспечить возможность перед эпитаксиальным выращиванием слоев очищать источники 62
 10 распыления, камера 20 может быть (но это не обязательно) оборудована подвижным экранирующим средством 82, позволяющим располагать экран 80 средства вблизи подложек 54 и ниже их, что предотвращает попадание на подложку частиц испаренных веществ в период разогрева.

В предпочтительном воплощении изобретения при эпитаксиальном выращивании нитридных полупроводников не применяются никакие химически активные газы. Дополнительные мишени 60а для распыления могут содержать легирующие вещества, которые предпочтительно использовать в элементной форме, - например, металлы Mg, Zn и т.п., играющие роль акцепторных примесей. Точно так же с помощью
 20 дополнительных мишеней 60а для распыления могут вводиться легирующие вещества, играющие роль донорных примесей, например кремний. В другом воплощении изобретения каждая пушка 62 для распыления может быть (но это не обязательно) снабжена заслонками (не показаны), позволяющими избежать взаимного загрязнения мишеней 60.

В процессе эпитаксиального выращивания на индуктор 30 подается питание ВЧ такой частоты, а давление газа в вакуумной камере 20 выбирается таким, что нагретые подложки 54 в полной мере подвергаются воздействию низкотемпературной плазмы. Типичные значения давлений в вакуумной камере 20 лежат в диапазоне от
 30 10^{-3} мбар до 10^{-1} мбар, а наиболее типичны значения в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-1} мбар. При указанных условиях как активированный азот, так и пары металлов от пушек 62 для распыления распространяются в плазме диффузионным переносом, и процесс происходит так, как описано выше.

В другом воплощении изобретения пушки 62 для распыления могут сочетаться с эффузионными ячейками 40; при этом предпочтительно, чтобы источники обоих типов были расположены симметрично вокруг диэлектрического окна 28. Ранее не предлагалось для эпитаксиального наращивания слоев сочетать применение эффузионных ячеек и пушек для распыления (служащих для испарения реагентов и
 40 легирующих примесей в элементной форме) с применением плотной низкотемпературной плазмы. В предпочтительном воплощении изобретения любой из металлов может испаряться с помощью нескольких пушек 62 для распыления и эффузионных ячеек 40. Каждый источник может иметь собственное значение интенсивности потока паров одного и того же металла, что позволяет легко
 45 осуществлять быстрые вариации скоростей роста и концентраций легирующих примесей путем переключения активности с одного источника на другой. В еще одном воплощении эффузионные ячейки 40 и пушки 62 для распыления могут быть заменены или дополнены электронно-лучевыми испарителями. Электронно-лучевые испарители
 50 дают особенно большие преимущества при испарении элементов, пары которых имеют низкое давление, так как в этом случае трудно достичь значительных величин потоков, если применять эффузионные ячейки 40.

Обратимся теперь к фиг.6, где представлено другое воплощение изобретения, в

котором устройство 10 включает источник 100 подачи плазмы, создающий широкую область горения плазмы, включающий блок термокатодов 130, средство 120 ввода инертного газа и интегрированный или изолированный анод 110. Предпочтительно, чтобы разность потенциалов между катодами 130 и анодом 110 была меньше, чем 30 В, благодаря чему обеспечивается, что сталкивающиеся с подложкой ионы обладают энергией, меньше, чем примерно 20 эВ. Плазмотрон 100, генерирующий плазму 140 с помощью дугового разряда, соединен с вакуумной камерой 200. В вакуумной камере, оборудованной загрузочным шлюзом 220, создается вакуум, - с помощью, например, турбомолекулярного насоса 210, соединенного с камерой 200 через клапан 205; в камере находится блок 230 нагрева подложек. К вакуумной камере присоединены подводящие газ линии 240 для ввода инертного газа, например азота, и дополнительных газов, например водорода. Плотность плазмы может быстро варьироваться с помощью изменения удерживающего магнитного поля, создаваемого катушками 250.

Кроме того, данная камера оборудована эффузионными ячейками 300, из которых могут испаряться металлы, такие как Ga и Al. В дополнительных ячейках 300 могут содержаться такие виды легирующих примесей, которые предпочтительно применять в виде элементов, - например, металлы (Mg, Zn и т.п.), действующие как акцепторные примеси. Эффузионные ячейки оборудованы затворами 310, позволяющими полностью перекрывать поступление паров металлов.

Нагретый блок подложек 400 в полной мере подвергается воздействию низкотемпературной плазмы, генерируемой дуговым разрядом плазмотрона и распространяющейся в вакуумную камеру через проникаемый анод 110. Дуговой разряд поддерживается термокатадами 130 в плазменной камере 200; он может поддерживаться при значениях давления в вакуумной камере, лежащих в широком диапазоне - от 10^{-4} мбар до, по крайней мере, 10^{-1} мбар, а наиболее типичны значения давления, примерно равные 10^{-2} мбар. Активированный плазмой азот, поток которого проходит через вакуумную камеру, реагирует с парами металлов, формируя эпитаксиальную пленку нитрида на подложке 400.

Для испарения металлов в сверхвысоком вакууме, например в системах для молекулярной эпитаксии, обычно применяют эффузионные ячейки. В данном случае они служат для ввода паров металлов в низкотемпературную плазму высокой плотности, которая генерируется при давлениях, типичные значения которых составляют примерно 10^{-2} мбар, при которых перенос вещества является диффузионным. Способ LEPEVPE, следовательно, является способом, протекающим при совершенно других условиях, чем другие способы. В одном воплощении изобретения область эффузионных ячеек 300 снабжена отдельной системой 320 вакуумной откачки с целью исключить тепловые реакции с нагретыми металлами внутри камеры и диффузионный перенос по соединительной трубке к вакуумной камере.

В предпочтительном воплощении изобретения для ввода каждого из испаряемых металлов может использоваться более чем одна эффузионная ячейка 300. Все такие ячейки могут функционировать при различных температурах, благодаря чему можно легко осуществлять быстрые изменения скоростей роста и концентраций легирующих примесей с помощью переключения активности с одной ячейки на другую. Кроме того, управление плотностью плазмы с помощью изменений магнитного поля, создаваемого катушками 250, может еще более расширить пределы динамических диапазонов скоростей роста.

В другом воплощении изобретения дополнительные подводящие газ линии 240a служат для поступления в вакуумную камеру в газообразной форме таких легирующих элементов, которые предпочтительно применять в газообразной форме. Предпочтительно, чтобы газообразные легирующие примеси, такие как кремневодород, применяемый для легирования донорной примесью, были разбавлены инертным газом, например аргоном. Динамический диапазон характеристик легирования может быть расширен, если для введения одной газообразной легирующей примеси применять более одной подводящей газ линии.

В способе, предлагаемом в изобретения, не участвует углерод, так как не требуются никакие углеродсодержащие газообразные исходные вещества. В предпочтительном воплощении способ осуществляется, кроме того, при отсутствии водорода. Такое воплощение является особенно предпочтительным при выращивании р-легированных слоев GaN, так как для способов без участия водорода не требуется никакой активации легирующих примесей тепловым отжигом. Так как способ LEPEVPE является способом, активируемым плазмой, он может осуществляться при более низких температурах подложки, чем температуры, характерные для сравниваемых способов, применяемых для аналогичных целей; при использовании этих способов механическое напряжение, обусловленное различием коэффициентов теплового расширения материалов эпитаксиального слоя и подложки, часто приводит к нежелательному трещинообразованию при охлаждении от температуры выращивания до обычной температуры.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Данный документ опирается на следующие документы, включаемые посредством ссылок.

Патентные документы США

6,472,300 10/2002 Nikolaev et al.

6,706,119 3/2004 Tsvetkov et al.

6,818,061 11/2004 Peczalski et al.

5,633,192 5/1997 Moustakas et al.

6,454,855 9/2002 von Kanel et al.

6,918,352 7/2005 von Kanel et al.

5,580,420 12/1996 Watanabe et al.

4,368,092 1/1983 Steinberg et al.

4,948,458 8/1990 Ogle

6,811,611 11/2004 Johnson

5,788,799 8/1998 Steger et al.

Другие патентные документы

WO 2006/000846 1/2006 von Kanel et al.

Дополнительные публикации

J.D. Brown et al., "Гетероструктурные полевые транзисторы на основе AlGaN/GaN, полученные на 100-миллиметровых подложках GaN, выращенных на кремниевых (111) подложках", Solid-State Electronics, Vol.46, No. 10 (October 2002) pp.1535-1539.

S. Nakamura, "Лазерные диоды на основе InGaN", Annual Reviews on Material Science, Vol.28 (1998) pp.125-152.

S. Nakamura, "Роль структурных дефектов в генерирующих синий свет светодиодах и лазерных диодах на основе InGaN", Science, Vol.281 (14 August 1998) pp.956-961.

G.A. Smith et al., "Эмиссия излучения с длиной волны 341 нм ультрафиолетовыми светодиодами, выращенными гидридной эпитаксией из газовой фазы", Journal of Applied Physics, Vol.95, No. 12 (15 June 2004) pp.8247-8251.

R.F. Davis et al., "Материалы на основе нитрида галлия: успехи, современное состояние и потенциальные проблемы". Proceedings of the IEEE, Vol.90, No. 6 (June 2002) pp.993-1004.

5 A. Dadgar et al., "Химическая эпитаксия на кремний нитрида галлия из газовой фазы металлоорганических материалов", physica status solidi (c), Vol.0, No. 6 (September 2003) pp.1583-1606.

10 T. Wang et al., "Подвижность электронов, превышающая 10^4 см²/Вс в одной гетероструктуре AlGaIn-GaN, выращенной на сапфировой подложке", Applied Physics Letters, Volume 74, No. 23 (7 June 1999) pp.3531-3533.

J. Blasing et al., "Первопричины уменьшения напряжения, обусловленного наличием низкотемпературных промежуточных слоев AlN", Applied Physics Letters, Vol.81, No. 15 (7 October 2002) pp.2722-2724.

15 C.R. Elsass, "Перенос электронов в гетероструктурах AlGaIn/GaN, выращиваемых с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии с участием плазмы", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.39, Part 2, No. 10B (15 October 2000) pp. L1023-L1025.

20 C. Rosenblad et al., "Эпитаксия кремния химическим осаждением из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой", Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol.16, No. 5 (Sept/Oct 1998), pp.2785-2790.

25 Heung-Sik Tae et al., "Низкотемпературная гомоэпитаксия кремния химическим осаждением из газовой фазы с использованием электронного циклотронного резонанса в сверхвысоком вакууме", Applied Physics Letters, Vol.64, No. 8 (21 February 1994) pp.1021-1023.

C.B. Vartuli et al., "Плазменное травление в ICl/Ar нитридов типа III-V с использованием электронного циклотронного резонанса", Applied Physics Letters, Vol.69, No. 10 (2 September 1996), pp.1426-1428.

30 W.Z. Collison et al., "Исследования плазменного травления пластин большого диаметра с использованием индуктивно-связанных источников подачи плазмы низкого давления, выполненные с применением моделирования плазмы и ленгмюровского зонда", Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol.16, No. 1 (Jan/Feb 1998), pp.100-107.

35 R.J. Shul et al., "Плазменное травление GaN индуктивно-связанной плазмой", Applied Physics Letters, Vol.69, No. 8 (19 August 1996), pp.1119-1121.

J. Hopwood, "Обзор видов индуктивно-связанной плазмы, применимых для плазменной обработки", Plasma Source Science and Technology, Vol.1, No. 2 (May 1992) pp.109-116.

40 D.S.Green et al., Легирование углеродом GaN посредством CBr₄ при молекулярно-лучевой эпитаксии с участием плазмы, генерируемой ВЧ-плазмотроном", Journal of Applied Physics, Vol.95, No. 12 (15 June 2004) pp.8456-8462.

45 H. von Kanel, "Очень высокая подвижность дырок в квантовых ямах неоднородно легированного Ge, выращенных способом химического осаждения из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой", Applied Physics Letters, Vol.80, No. 16 (22 April 2002), pp.2922-2924.

50 P. Sutter et al., "Квантовый перенос в гетероструктурах Si/Si_{1-x}Ge_x, получаемых испарением и эпитаксией", Applied Physics Letters, Vol.67, No. 26 (25 December 1995), pp.3954-3956.

Формула изобретения

1. Вакуумная установка для эпитаксиального выращивания полупроводников

5 типа III-V, содержащая вакуумную камеру (20, 200), которая поддерживает давление от приблизительно 10^{-3} мбар до 1 мбар во время эпитаксиального выращивания, размещенный в вакуумной камере подложкодержатель (50, 230), установленный с
 10 возможностью закрепления и нагрева подложек (54, 400), источники (40, 40', 62, 62', 300, 300') испарения веществ и ввода частиц пара в вакуумную камеру, которые являются частицами металлов в элементной форме, металлических сплавов и легирующих примесей, систему (22', 23', 240') ввода и распределения газов в вакуумную камеру, источник (31, 100) подачи плазмы в вакуумную камеру (20, 200),
 15 генератор (70, 250) магнитного поля для создания магнитного поля, позволяющего придать требуемую форму плазме (36, 140) в вакуумной камере (20, 200), отличающаяся тем, что она выполнена с возможностью осуществления диффузного распространения частиц газов и паров металлов в вакуумной камере (20, 200), активизации газов и паров металлов плазмой (36, 140) для вступления в реакцию и
 20 формирования однородного эпитаксиального слоя (55) на нагретой подложке (54, 400), прикрепленной к подложкодержателю (50, 230) посредством эпитаксии из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой.

2. Установка по п.1, отличающаяся тем, что источник (31) подачи плазмы выбран
 25 из группы, включающей источники плазмы, использующие электронный циклотронный резонанс, индуктивно-связанные источники плазмы и источники плазмы, использующие дуговой разряд постоянного тока.

3. Установка по п.1, отличающаяся тем, что источники испарения веществ для
 30 получения паров металлов в элементарной форме или металлических сплавов, выбраны из группы источников, позволяющих создавать потоки паров металлов, включающей эффузионные ячейки (40, 300) и источники (62) распыления.

4. Установка по п.1, отличающаяся тем, что источники испарения для получения
 35 легирующих примесей выбраны из группы источников, включающей эффузионные ячейки (40'), источники (62') распыления и источники (23') реакционноспособных газов.

5. Установка по п.1, отличающаяся тем, что газы, вводимые в вакуумную камеру
 системой ввода и распределения газов, являются нетоксичными и нереакционноспособными газами, такими как аргон и азот.

6. Установка по п.2, отличающаяся тем, что индуктивно-связанный источник (31)
 40 подачи плазмы представляет собой спиральный индуктор.

7. Установка по п.2, отличающаяся тем, что источник (100) подачи плазмы является
 45 дуговым источником постоянного тока, имеющим по меньшей мере один термокатод (130), при этом катоды источника подачи плазмы соединены с анодом (110), проницаемым для плазмы.

8. Установка по п.7, отличающаяся тем, что она снабжена распределительной
 50 головкой с отверстиями, формирующей поток инжектируемой в камеру плазмы (125), соединенной с проницаемым анодом таким образом, что плазма (140) в области осаждения имеет однородную плотность, при этом источник подачи плазмы (100) генерирует плазму в широкой плазменной области.

9. Установка по п.1, отличающаяся тем, что она выполнена с возможностью
 55 создания условий для активированных плазмой газов, при которых они реагируют в области осаждения с парами металлов, активированными плазмой, формируя эпитаксиальные слои (55, 410) на нагретых подложках (54, 400), закрепленных на нагретом подложкодержателе (50, 230), причем чистота нанесенного в соответствии с шаблоном слоя достаточно высока для последующей эпитаксии полупроводниковых нитридных слоев.

10. Установка по п.1, отличающаяся тем, что она выполнена с возможностью создания условий для реакции активированного плазмой газообразного азота в области осаждения с активированными плазмой парами металлов, выбираемых из группы, включающей Ga, In и Al, с формированием эпитаксиального полупроводникового слоя нитрида на подложках, прикрепленных к нагретому подложкодержателю.

11. Установка по п.1, отличающаяся тем, что источники (40', 60', 300', 23') испарения легирующих примесей содержат элементы, выбранные из группы, включающей Si, Mg, Zn, Be и Cd.

12. Установка по п.1, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит заслонки (42, 80, 310) для перекрытия потоков паров металлов и легирующих примесей.

13. Установка по п.1, отличающаяся тем, что по меньшей мере один из источников имеет изолированную систему (320) вакуумной откачки.

14. Установка по п.1, отличающаяся тем, что по меньшей мере один источник (40, 40', 62, 62', 300, 300') испарения выполнен с возможностью испарения каждого из испаряемых веществ, при этом источники испарения одного вещества выполнены с возможностью испарения потоков паров этого вещества варьiruемой интенсивности.

15. Установка по п.4, отличающаяся тем, что она содержит источники (23') подачи в вакуумную камеру газообразных легирующих примесей, таких как кремневодород, смешанный с инертным газом.

16. Установка по п.2, отличающаяся тем, что источником (100) подачи плазмы является дуговой источник постоянного тока, рабочее напряжение которого составляет менее 30 В, тем самым обеспечивая энергию ионов, сталкивающихся с подложкой, меньшую примерно 20 эВ.

17. Установка по п.1, отличающаяся тем, что генератор магнитного поля (70) является средством изменения напряженности магнитного поля в области размещения подложки, и установлен с возможностью быстрого изменения плотности плазмы вблизи подложки (54, 400).

18. Установка по п.1, отличающаяся тем, что генератор (70) магнитного поля является средством периодического изменения направления магнитного поля и повышения однородности плазмы вблизи подложки (54, 400).

19. Способ эпитаксиального выращивания слоев полупроводниковых соединений типа III-V, отличающийся тем, что в вакуумной камере, в которой поддерживается плазма при таких значениях плотности и давления, при которых частицы газов и металлов диффузно распространяются в плазменной области, испаряют по меньшей мере один металл, активируют частицы газа и металла, затем осуществляют реакции между парами металлов и высокоактивными газами неметаллических элементов, в результате которых на нагретой подложке, погруженной в плазму, выращивают полупроводниковый слой и обеспечивают эпитаксиальный рост слоев полупроводникового соединения.

20. Способ по п.19, отличающийся тем, что осуществляют эпитаксию монокристаллов из активированной плазмой газовой фазы, при этом в процессе испарения пары металлов из группы металлов, включающей галлий, алюминий и индий, смешивают с газообразным азотом в форме N_2 в вакуумной камере (20, 200) в таких относительных концентрациях и при таком давлении, что частицы газов и металлов распространяются диффузно, а в процессе осуществления реакций пары металлов и газообразный азот N_2 подвергают воздействию плазмы (36, 140) в

вакуумной камере, посредством чего активизируют частицы металлов и азота, затем в плазме (36, 140) производят реакцию активированных паров металлов и активированного газообразного азота, и тем самым создают условия, вызывающие эпитаксиальное наращивание в плазме слоя нитрида металла (55, 410) на полупроводниковой подложке (54, 400), погруженной в плазму (36, 140), и осуществляют выращивание полупроводникового монокристаллического нитрида.

21. Способ по п.19, отличающийся тем, что осуществляют эпитаксию монокристаллов из активированной плазмой газовой фазы, при этом в процессе испарения пары галлия и газообразный азот в форме N_2 смешивают в вакуумной камере в таких относительных концентрациях и при таком давлении, что частицы газов и металлов распространяются диффузно, при этом пары галлия и газообразный азот подвергают воздействию плазмы в вакуумной камере, чем активируют газообразный азот, при этом реакцию активированных паров галлия и активированного газообразного азота производят в плазме, чем создают условия, вызывающие эпитаксиальное выращивание в плазменной области слоя нитрида галлия на полупроводниковой подложке, погруженной в плазму (36, 140), и осуществляют выращивание полупроводникового монокристаллического нитрида галлия.

22. Эпитаксиальный слой нитрида металла, выращенный посредством способа по п.19, отличающийся тем, что эпитаксиальный слой нитрида металла является шаблоном, предназначенным для выращивания активного слоя, включая слой, представляющий собой эпитаксиальную гетероструктуру нитрида металла, при этом способ выращивания активного слоя выбирают из группы способов, включающей молекулярно-лучевую эпитаксию, металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы и эпитаксию из газовой фазы, активированной низкотемпературной плазмой.

23. Эпитаксиальная гетероструктура нитрида металла, сформированная посредством способа по п.19, отличающаяся тем, что она представляет собой многослойную структуру, включающую активные слои, предназначенную для изготовления прибора, выбранного из группы, включающей светодиоды, лазеры и высокочастотные приборы большой мощности.

24. Устройство генерации низкотемпературной плазмы высокой плотности для эпитаксии из активированной плазмой газовой фазы, отличающееся тем, что оно содержит вакуумную камеру (20, 200) с внутренним пространством для плазмы (36, 140) с активированными частицами газов и металлов, диффузно распространяющимися в ней, и для размещения полупроводниковой подложки (54, 400), установленной в нем с возможностью ионного контакта с плазмой (36, 140); источник (31, 100) подачи плазмы, сообщающийся с вакуумной камерой (20) и выполненный с возможностью генерации плазмы во внутреннем пространстве (21) камеры и управления параметрами плазмы; блок (50, 230) осаждения, по крайней мере частично находящийся во внутреннем пространстве камеры и электрически изолированный изоляторами (26) от вакуумной камеры, причем блок осаждения содержит держатель подложки для закрепления полупроводниковой подложки (54) в прямом ионном контакте с плазмой, генерируемой во внутреннем пространстве камеры; нагреватель (52, 230), регулируемый с возможностью нагрева полупроводниковой подложки до 1100°C ; систему (22', 23', 240') распределения газовых потоков, выполненную с возможностью управляемого ввода газов во внутреннее пространство камеры и регулирования давления газов и состава газовой

смеси во внутреннем пространстве камеры, причем система распределения газовых потоков имеет по крайней мере одно средство (22, 23, 240) ввода газов, добавляемых во внутреннее пространство камеры; выходная линия для удаления газа из внутреннего пространства (24', 210) камеры; по крайней мере один источник (40, 60, 300) паров металлов для инъекции во внутреннее пространство камеры паров металлов; и по крайней мере один источник (40', 60', 300) легирующих примесей для введения легирующих примесей во внутреннее пространство камеры.

25. Полупроводник, имеющий подложку размером до 300 мм, на которой посредством эпитаксиального осаждения без участия углерода выращены полупроводниковые слои нитридов, полученный способом по п.19.

26. Полупроводник по п.25, отличающийся тем, что он содержит слой свободного от водорода эпитаксиального нитрида.

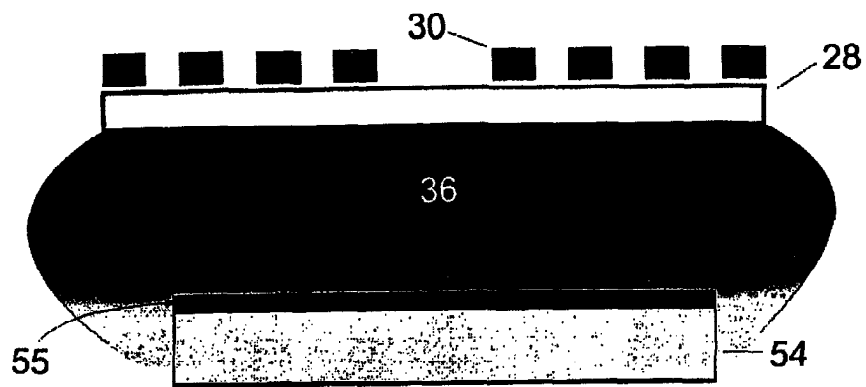
27. Полупроводник по п.26, отличающийся тем, что слой эпитаксиального нитрида выращен при значениях скорости роста, лежащих в диапазоне от 0,1 нм/с до 10 нм/с.

28. Полупроводник по п.26, отличающийся тем, что слой эпитаксиального нитрида выращен при значениях скорости роста, лежащих в диапазоне от 1 нм/с до 10 нм/с.

29. Полупроводник по п.26, отличающийся тем, что он содержит слой эпитаксиального нитрида, легированного примесями.

30. Полупроводник по п.26, отличающийся тем, что он содержит слой эпитаксиального нитрида, выращенного на подложке при температуре ниже 1000°C.

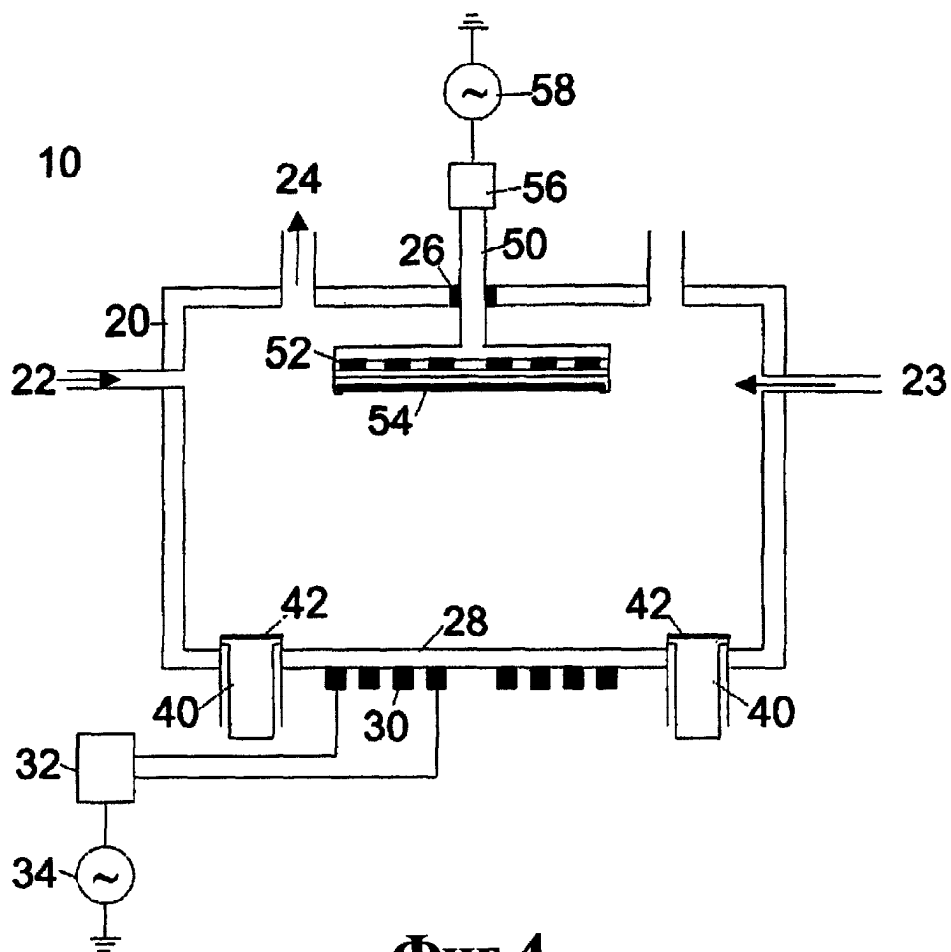
31. Полупроводник по п.26, отличающийся тем, что он содержит слой эпитаксиального нитрида, выращенного на подложке при температуре ниже 800°C.



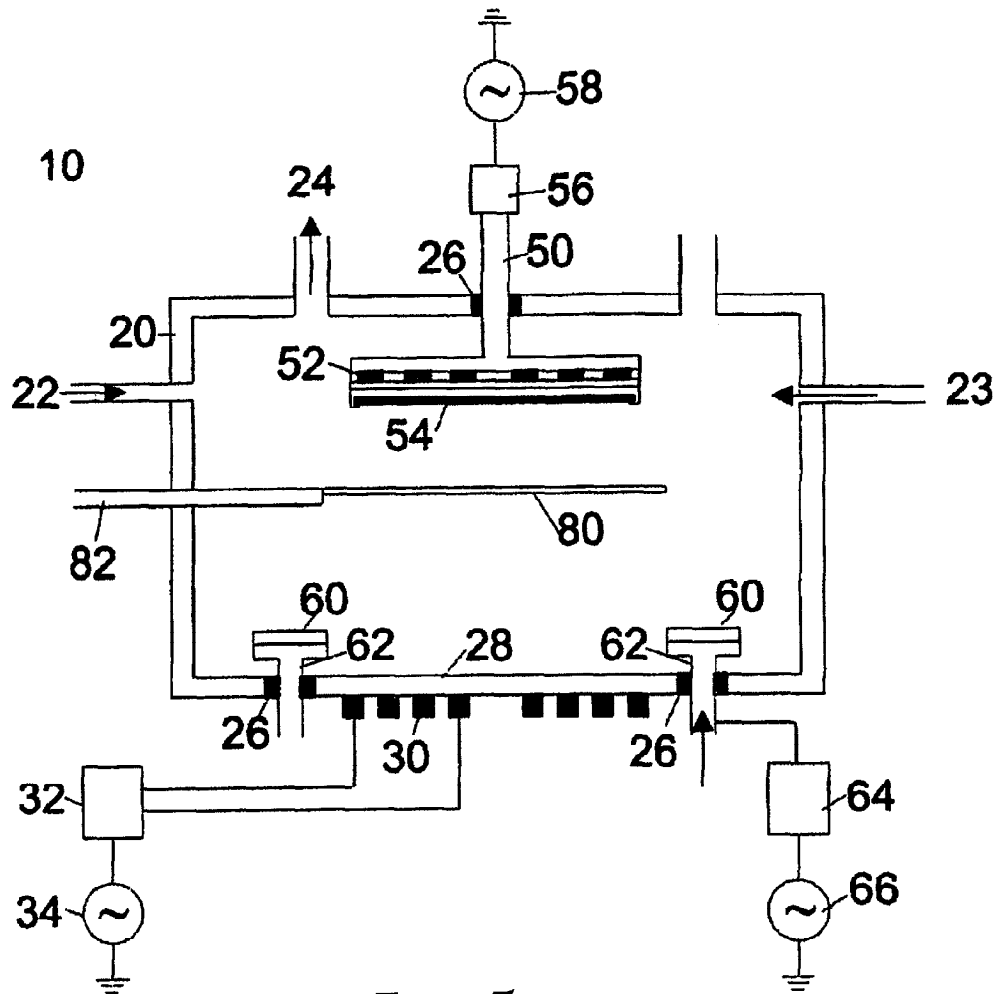
Фиг.2



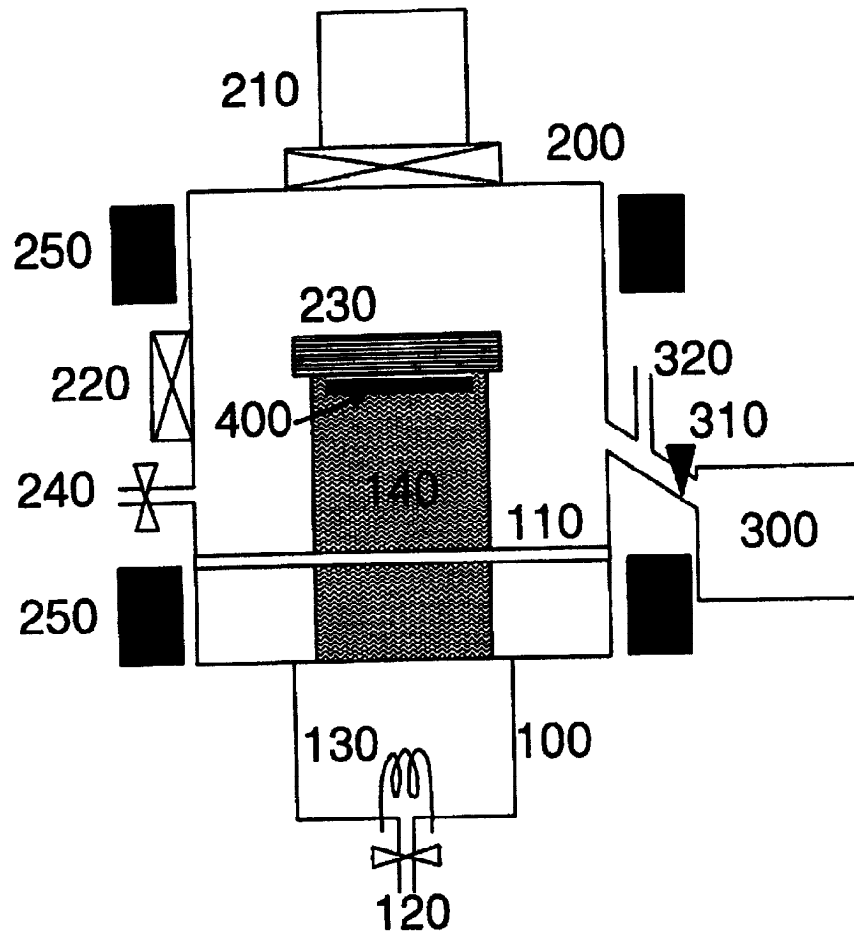
Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5



Фиг.6