

Д. т. н. В. А. ВОРОНИН, к. т. н. С. К. ГУБА,
д. ф.-м. н. И. В. КУРИЛО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»
E-mail: gubask@polynet.lviv.ua, kuryloiv@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
19.05 2009 г. — 02.02 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЫЙ
(НПП «Сатурн», г. Киев)

ПОЛУЧЕНИЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ СТРУКТУР СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Исследована технология получения изотермическим низкотемпературным методом хлоридной эпитаксии совершенных структур GaAs, легированного Sn и Bi. На основе таких структур созданы силовые биполярные и полевые транзисторы с улучшенными характеристиками.

Прогресс в развитии силовых и СВЧ полупроводниковых приборов, в том числе силовых биполярных транзисторов (СБТ), полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и цифровых больших интегральных схем (БИС) на базе этих приборов, связан с использованием арсенида галлия [1]. Для практической реализации преимуществ этого материала необходимо решить комплекс задач по оптимизации конструктивных особенностей приборов с учетом технологических средств их изготовления, которые существенно отличаются от средств для приборов на базе кремния.

Наиболее универсальным и технологичным методом получения GaAs-структур является метод газофазной эпитаксии (ГФЭ) из металлоорганических соединений элементов третьей группы с гидридами мышьяка и фосфора. При этом методе получение однородных по толщине слоев и возможность контролировать состав не вызывает затруднений в отличие от метода ГФЭ в хлоридных или хлоридно-гидридных системах. Однако последний метод обеспечивает высокую степень чистоты слоев от углерода, которая соответствует высоким требованиям к концентрации остаточных неконтролируемых примесей, и поэтому является одним из перспективных для создания структур СБТ и ПТШ на основе арсенида галлия. Метод ГФЭ в хлоридной или в хлоридно-гидридной системах [2] обеспечивает возможность выращивания слоев на основе арсенида галлия микрометрической и субмикрометрической толщины, а также создание всей структуры СБТ типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ и ПТШ типа $i-n^0-n-n^+$ в едином технологическом процессе.

БИС на основе полевых транзисторов Шоттки (изготовленных на базе структуры $i-n^0-n-n^+$) и СБТ (типа $n^+-n-n^0-p-n^+$) имеют нестабильные электрофизические параметры и низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

Эта нестабильность электрофизических параметров возникает за счет взаимной диффузии легирующих компонентов из n^0 -буферного слоя в активный n -слой, в результате которой вблизи границы раздела между n^0 - и n -слоем формируются дополнительные электронные уровни, распространяющиеся в активную область. Диффузия приводит к возникновению кратко- и долговременного дрейфа. Причиной низкой воспроизводимости параметров по площади выращенного активного эпитаксиального слоя является неравномерное распределение на самой подложке плотности дислокаций легирующих и неконтролируемых примесей.

В настоящей работе исследовалась возможность получения совершенных структур СБТ и ПТШ на базе арсенида галлия для БИС с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Силовой биполярный транзистор

Обычно такие приборы используются со слаболегированным коллектором, а метод газофазной эпитаксии обеспечивает возможность выращивания слоев n -типа с концентрацией электронов 10^{14} — 10^{15} см $^{-3}$, а также создания всей структуры типа $n^+-n-n^0-p-n^+$ в едином технологическом процессе (рис. 1).

В транзисторе с высокоомным коллектором желательно обеспечить увеличение концентрации при-

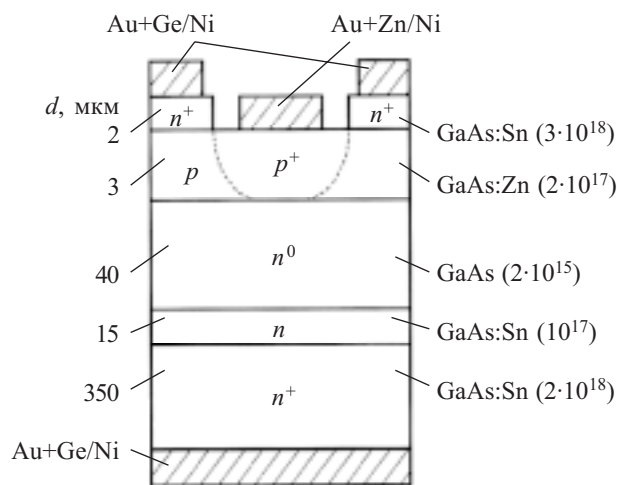


Рис. 1. Схема структуры транзистора с селективно выращенным эмиттером (в скобках указана концентрация носителей N в слое в см $^{-3}$)

меси p -типа в базе до максимально возможного уровня. Это обусловлено, во-первых, необходимостью компенсировать эффект вытеснения эмиттерного тока при высокой его плотности, уменьшить размеры области объемного заряда, а во-вторых, необходимо уменьшить сопротивление пассивной части базы. Такие меры предотвратили бы прокол базы и дали бы возможность реализовать преимущества уменьшения размеров p -области для повышения быстродействия приборов и коэффициента передачи эмиттерного тока. Однако концентрация дырок в базе для транзисторов с гомо- p - n -переходами принципиально ограничена уровнем порядка $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что определяется границей легирования эмиттера ($N_e = 5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

Выращивание n^+ -пленок большой площади методом паровозной эпитаксии (ПФЭ) в хлоридных проточных системах, которые отвечают одновременно условиям предельного гомогенного легирования и однородного распределения примеси на поверхности подложки, требует решения многопараметрической задачи оптимизации процесса. Это связано, главным образом, с тем, что для достижения каждого из этих условий нужно применить конкурирующие технологические операции. Поэтому решалась комплексная задача создания высоковольтных биполярных транзисторов большой площади с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Было исследовано распределение концентрации носителей $N_e(x)$ вдоль подложки в зависимости от общей площади S подложек GaAs при легировании оловом до уровня $N_e = (3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Структуру типа GaAs:Sn–GaAs:Zn получали методом ПФЭ в хлоридной системе GaAs–AsCl₃–H₂ в горизонтальном прямоточном многоканальном реакторе [3]. Использовались подложки типа АГЧПК-4-62, ориентированные в направлении [110] с отклонением на 3° от плоскости (100). Известно, что максимальная однородность слоев по толщине и уровню легирования в хлоридном методе ПФЭ достигается при реализации таких режимов роста, когда скорость кристаллизации основного соединения и скорость вхождения примеси ограничиваются кинетикой соответствующих процессов на поверхности подложки GaAs. Такие режимы при атмосферном давлении характеризуются высоким парциальным давлением основных и легирующих компонентов и относительно низкой температурой подложки (690–710°C) [4]. Известно, что эффективные константы распределения легирующих примесей в GaAs обычно являются функциями концентрации основных компонентов в газовой фазе (GaCl, As₄, HCl) и уменьшаются с ростом этих концентраций при снижении температуры выращивания [5].

Компенсировать эту зависимость увеличением парциального давления молекул примесей в большинстве случаев невозможно, поскольку, во-первых, процесс вхождения примесей Sn и Zn в кристаллическую решетку либо протекает с некоторыми диффузионными ограничениями массопереноса [5], либо ограничен низкой растворимостью в твердой фазе. Из этого следуют или пространственная неоднородность N_e , или недостаточный уровень легирования

эмиттера. Во-вторых, высокая концентрация примесей в атмосфере реактора отрицательно влияет на фоновые концентрации носителей заряда в слаболегированном коллекторе и может привести к локальному формированию пересыщенного твердого раствора в n^+ -слое и к его распаду с образованием новой фазы в матрице GaAs.

В качестве легирующей примеси n -типа в эмиттерах транзисторов на основе GaAs используют Sn. Этот элемент позволяет получать концентрацию свободных электронов на уровне $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в n^+ -слоях достаточно совершенной структуры GaAs, выращенной методом ПФЭ в хлоридной системе. Такое легирование способствует увеличению скорости роста структуры. Высокую концентрацию электронов можно получить при температуре подложки выше 720°C, когда процесс эпитаксии в значительной степени лимитируется диффузией компонентов в паровой фазе. Таким образом, технологический режим ограничен рядом внешних параметров. Чтобы получить однородную по координате x скорость роста структуры $V(x)$, для выбранных значений концентрации основных компонентов в системе, температуры роста, геометрии реактора и площади используемых подложек S необходимо задать изменение температуры вдоль подложки $T(x)$. Ось x берет свое начало у торца первой подложки (начало зоны роста) и направлена вдоль прямоточного горизонтального реактора по ходу газового потока.

На рис. 2 показан характер распределения электронов вдоль подложки в слоях арсенида галлия, легированного оловом, при различной эффективной (покрытой выращенным слоем) площади подложки.

Абсолютную величину парциального давления трихлорида мышьяка, который подается в область источника олова (10^{-1} мм рт. ст.), выбирали такой, чтобы концентрация электронов в n^+ -слое (см. рис. 1) в начале зоны роста составляла $(3-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2). Высокие значения относительной неоднородности легирования $\Delta N_e / N_e$ вызываются следующими причинами.

Рост структуры GaAs происходит в диффузионно-кинетической области режима, в то же время про-

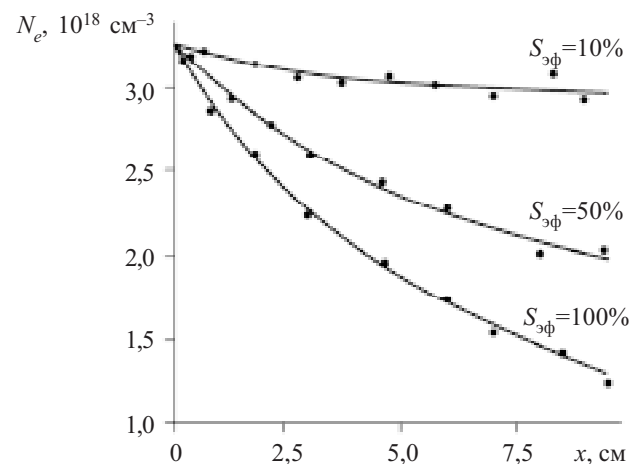


Рис. 2. Зависимость распределения концентрации электронов в пленке GaAs вдоль подложки при различной эффективной площади подложки

цесс легирования является практически равновесным (т. е. проходит намного быстрее) [5]. Уменьшение активности легирующей примеси (олова) приводит к более однородному легированию.

С увеличением координаты x рост парциального давления хлористого водорода в ниспадающем температурном поле приводит к дополнительному уменьшению активности олова α_{Sn} в GaAs. Поэтому повышение однородности скорости роста пленки за счет увеличения отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ над зоной роста приводит, при прочих равных технологических условиях, к более резкой координатной зависимости концентрации электронов в пленке. В то же время, уменьшение отрицательного градиента температуры $\Delta T(x)$ приводит к некоторому уменьшению наклона кривой $N_e(x)$, но при этом величина изменения скорости роста слоя арсенида галлия, легированного оловом, вдоль подложки возрастает.

Таким образом существует оптимальное значение градиента температуры при фиксированной эффективной площади подложек. Уменьшение эффективной площади подложек вызывает сдвиг оптимального значения и приводит к улучшению распределения электронов (изменению наклона кривой $N_e(x)$ на рис. 2) и однородности скорости роста слоя вдоль подложки.

Известно, что при одинаковом уровне легирования удельное сопротивление пассивных областей базы в структурах GaAs в несколько раз выше, чем в кремниевых аналоговых приборах. Кроме того, в технологической операции создания приконтактного слоя обычно используют базовые слои с концентрацией акцепторов около 10^{19} см^{-3} . Для снижения сопротивления неактивной части базы до единиц Ом в зону, которая находится под контактом базы транзистора (область p^+ на рис. 1), проводили диффузию Zn на глубину 2—3 мкм до уровня $N_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с поверхностной концентрацией около 10^{20} см^{-3} .

В начале повторной эпитаксии возможно образование границы с повышенной плотностью дефектов и, соответственно, скоростью рекомбинации инжектированных неравновесных электронов. Чтобы избежать этого, в процессе селективного наращивания после обычного газового травления p -базы на общую глубину 0,5 мкм предварительно осаждали слой p -типа с параметрами, эквивалентными параметрам базы, а затем формировали эмиттер толщиной около 2 мкм. Такая последовательность операций обеспечивает пространственное разделение границы между металлом и p - n -переходом «эмиттер—база».

Для создания силового варианта транзистора необходимо дополнительно провести операции формирования силовых контактов и напаивания структуры на термокомпенсатор для защиты p - n -переходов и расположения ее в корпусе.

Полевой транзистор

Как уже было отмечено, БИС на основе полевых транзисторов Шоттки, изготовленных на базе структуры i - n^0 - n - n^+ (рис. 3), имеют нестабильные электрофизические параметры, низкую их воспроизводимость по поверхности пластины.

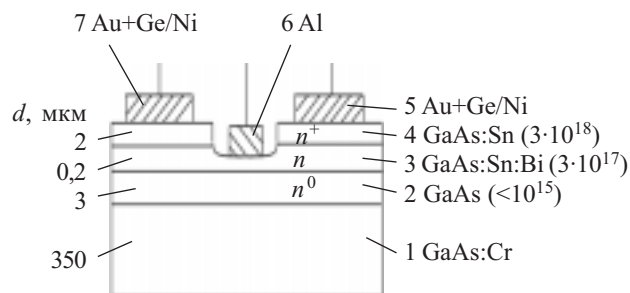


Рис. 3. Схема полевого транзистора с барьером Шоттки (в скобках указана концентрация электронов в слое в см^{-3}): 1 — подложка типа АГЧПХ; 2 — буферный n^0 -слой; 3 — активный n -слой; 4 — приконтактный n^+ -слой; 5 — сток; 6 — затвор; 7 — источник

Авторами [6] были проанализированы возможные механизмы снижения плотности дислокаций в активном n -слое. Показано, что для создания 3—4-слойных структур необходимо учитывать тип и концентрацию легирующей примеси в подложке и слое, количество слоев и последовательность их расположения в структуре. Кроме того, известно, что широко применяемые подложки типа АГЧПХ отличаются высокой неоднородностью от центра к периферии коррелирующих между собой плотности дислокаций и неконтролируемых примесей. Во время наращивания активных слоев полевых транзисторов Шоттки на поверхности подложки происходит неравномерное прорастание дислокаций и диффузия неконтролируемых примесей из площади подложки в активную область ПТШ. Это приводит к пространственному изменению характеристик ПТШ, полученных на этой подложке. Для снижения отрицательного влияния подложки используют буферные слои, тип и параметры которых определяют величину подвижности электронов и уровень их компенсации в активном слое, а в конечном случае — крутизну вольт-амперной характеристики, шумовые и частотные характеристики ПТШ и их стабильность [2].

Основной задачей при эпитаксиальном выращивании является снижение температуры и обеспечение изотермического режима роста соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [7, 8]. Это связано с тем, что снижение температуры эпитаксии приводит к уменьшению микронеоднородности наращиваемого слоя вследствие уменьшения диффузии примесей и концентрации собственных точечных дефектов, для которых дислокации являются эффективным геттером.

Для создания n^0 -буферного слоя был использован разработанный низкотемпературный метод роста [9], позволяющий в одном технологическом цикле прямогоочного горизонтального реактора наращивать слой n^0 -типа из чистого GaAs толщиной 2—3 мкм. Наибольшая неоднородность скорости роста n^0 -слоя наблюдается на первых 1,5—2 см зоны осаждения GaAs в подсистеме $\text{GaAs}-\text{AsCl}_3-\text{H}_2$ (рис. 4). В этой области происходит встраивание в n^0 -слой неконтролируемых примесей, которые попадают в газовую фазу из твердого источника GaAs. При этом основной неконтролируемой примесью, которая попадает в

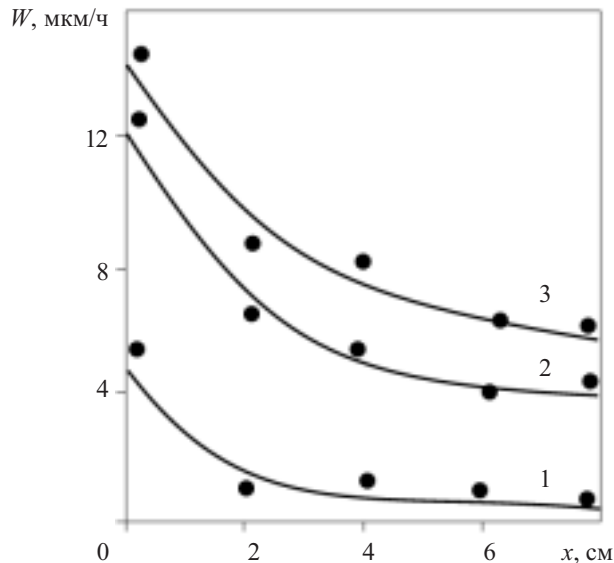


Рис. 4. Изменение скорости роста W слоя GaAs вдоль подложки при разном составе газовой фазы в реакторе, а именно при различной суммарной концентрации хлоридов α_{Cl} (в %):
1 — 0,1; 2 — 0,55; 3 — 0,9

активный n -слой (GaAs:Sn) из паровой фазы, является кремний.

В [10] показано, что в объемных кристаллах GaAs и GaP обнаружено снижение концентрации неконтролируемой примеси кремния вследствие изоэлектронного легирования. Причем, степень уменьшения концентрации Si в GaAs зависит от того, какой из изovalентных примесей будет легирован GaAs. Концентрация Si последовательно убывает при легировании примесями Sb–In–Bi. В связи с этим в [11] авторы исследовали формирование газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He с целью получения источника роста Bi в GaAs в виде BiCl₃ при низких температурах роста (670–720°C). Было показано, что в подсистеме Bi–AsCl₃–He при взаимодействии Bi с AsCl₃ в атмосфере He насыщение BiCl₃ достигается при температуре 600–620°C, а в подсистеме Bi–HCl–H₂ насыщение BiCl₃ достигается при температуре 800–830°C. Это позволяет утверждать, что подсистемы Bi–AsCl₃–He и GaAs–AsCl₃–H₂ системы GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He могут быть использованы каждая отдельно в одном из каналов многоканального реактора, описанного в [12], для формирования паровой фазы при низкотемпературном изотермическом росте GaAs, легированного Bi.

Для получения активного n -слоя структуры ПТШ оптимизировали температурный режим роста и состав газовой фазы в системе GaAs–Bi–AsCl₃–HCl–H₂–He. Минимальный разброс (порядка 2%) по толщине тонких слоев, легированных оловом и висмутом, наблюдается в узком интервале концентрации $5 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-3} мольных долей AsCl₃ при фиксированной температуре роста 700°C. Максимальную однородность получаемых пленок GaAs:Sn:Bi можно объяснить тем, что при указанном режиме роста скорость встраивания атомных компонентов в структуру наращиваемо-

го слоя становится соизмеримой со скоростью их массопереноса. Для выравнивания степени легирования активного слоя оловом был использован дополнительный, по сравнению с [12], канал введения HCl–H₂ в зону роста при небольшом отрицательном градиенте температуры подложки $\Delta T/x = -2^\circ\text{C}/\text{см}$. Кроме того, через еще один канал в зону роста подавался BiCl₃–He, который дополнительно легировал GaAs изovalентной примесью Bi. Поскольку коэффициенты распределения олова и висмута между газовой фазой и арсенидом галлия пропорциональны концентрации HCl, вследствие трехкратного уменьшения скорости роста в точке $x=0$ (передний торец подложки) и одновременного увеличения HCl в паровой фазе уменьшается скорость обеднения SnCl₂ и BiCl₃ приблизительно в четыре раза при постоянной температуре роста. Это позволило получить воспроизводимые и однородные по толщине и степени легирования активные n -слои с подвижностью носителей $4300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре 22°C и концентрацией носителей заряда $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Параметры подконтактного слоя не обязательно должны удовлетворять высокой однородности легирования в плоскости структуры, поскольку при уменьшении контактного сопротивления до $(1-5) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ последующее снижение сопротивления стока и истока перестает быть определяющим на фоне сопротивления пассивной области канала ПТШ. Для получения необходимого контактного сопротивления между n^+ -приконтактным слоем и омическим контактом на базе Au+Ge/Ni достаточно достичь концентрации олова в арсениде галлия порядка 10^{18} см^{-2} . Для осаждения подконтактного слоя с такой концентрацией электронов концентрация AsCl₃, подведенного к источнику олова, была увеличена до $2,3 \cdot 10^{-2}$ мольной доли, что позволило обеспечить необходимые параметры. Полученные эпитаксиальные структуры на подложках диаметром 40 мм были использованы для создания маломощных ПТШ с длиной затвора 1,5 мкм и расстоянием «сток–исток» 5 мкм на полезной площади $30 \times 40 \text{ мм}$. Напряжение на затворе транзистора, при

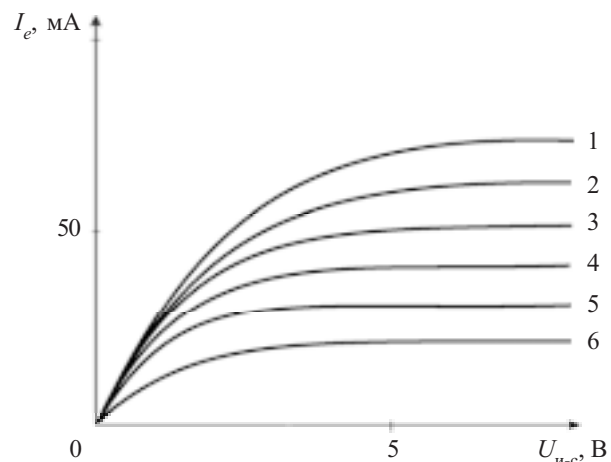


Рис. 5. Выходные ВАХ полевого транзистора с барьером Шоттки на базе GaAs в схеме с общим истоком при разном значении $U_{и-с}$ (в В):
1 — 0; 2 — -1; 3 — -2; 4 — -3; 5 — -4; 6 — -5 [13]

котором происходило полное перекрытие канала, определяется напряжением «затвор—исток» $U_{з-и} = 4$ В. Крутизну характеристик ПТШ измеряли при напряжении «сток—исток» $U_{с-и} = 2$ В. На рис. 5 показаны ВАХ для совокупности таких транзисторов.

Значение крутизны ВАХ ПТШ, полученных в одном технологическом цикле в системе GaAs—Bi—AsCl₃—HCl—H₂—He, находилось в интервале 20—21 мА/В, а разброс их величины не превышал 3—5%.

Разброс параметров приборов в пределах одной подложки не коррелирует с координатой подложки в реакторе в процессе роста, а определяется дислокационной неоднородностью структуры и ее электрофизическими характеристиками, а также различными эффектами топологии.

Заключение

Таким образом, показана принципиальная возможность создания планарных слоев структур биполярных транзисторов типа n^+-n^0-p и планарных слоев структур типа $i-n^0-n^+$ полевых транзисторов с барьером Шоттки на базе GaAs в хлоридных или хлоридно-гидридных системах.

Для получения таких структур были решены комплексные технологические задачи, определены режимы роста слоев GaAs. Достигнутая неоднородность по толщине не превышает 3%, а по уровню легирования — 5%. Это позволило получить улучшенные эксплуатационные характеристики СБТ и ПТШ на базе GaAs.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Уисмен У., Френсли У., Уестфел Дж. и др. Арсенид галлия в микроэлектронике.— М.: Мир, 1988.
2. Ди Лоренцо Д. В., Канделоула Д. Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления.— М.: Радио и связь, 1988.

3. Guba S. K. Producing of power GaAs bipolar transistor in the GaAs—AsCl₃—H₂ system // Functional materials.— 1999.— Vol. 6, N 4.— P. 702—705.

4. Guba S. K. Preparation of uniform - structured field effect transistors with Shottky barrier by low-temperature chloride epitaxy method // Functional materials.— 1998.— Vol. 5, N 1.— P. 127—129.

5. Дьяконов Л. И., Ивлев В. Н., Липатова Н. И. и др. Особенности газового легирования оловом эпитаксиальных слоев арсенида галлия в системе Ga—AsCl₃—H₂ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1986.— Т. 22, № 3.— С. 360—362.

6. Guba S. K., Kurilo I. V. Some features of defect formation in transition regions of multilayer GaAs homoepitaxial structures // Functional materials.— 2000.— Vol. 7, N 4 (2).— P. 815—818.

7. Гудз Э. С., Лукашин Г. А., Марончук И. Е. и др. Выращивание эпитаксиальных слоев в системе Ga—AsCl₃—H₂ при пониженной температуре // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.— 1977.— Т. 13, № 19.— С. 1706—1710.

8. Губа С. К. Низкотемпературный изотермический метод хлоридной эпитаксии In_{1-x}Ga_xAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 2.— С. 40—42.

9. Пат. 18621 України. Спосіб одержання структур GaAs для інтегральних схем на основі польових транзисторів Шоттки / В. О. Воронін, С. К. Губа, Л. С. Плахотна.— 25.12.1997.

10. Ганина Н. В., Уфимцев В. Б., Фистуль К. И. Очистка арсенида галлия изовалентным легированием // Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8.— С. 620—623.

11. Guba S. K., Kurilo I. V. Gas-phase formation at the low-temperature isothermal growing of Bi - doped GaAs layers // Functional Materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 234—239.

12. Seki H., Koukitu A. New vapor growth method for III-V compound semiconductors using a single flat temperature zone // J. Semicond. Technol.— 1986.— Vol. 19, N 81.— P. 225—229.

13. Voronin V. O., Guba S. K., Kurylo I. V. Production of GaAs transistors with the Schottky barrier in Bi—GaAs—AsCl₃—HCl—SnCl₂—H₂—He system by epitaxial deposition // Journ. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.— 2006.— Vol. 9, N 4.— P. 48—53.

НОВЫЕ КНИГИ

Пономарев В. Ф. Дискретная математика для инженеров.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 320 с.

Дискретная математика нашла широкое применение в исследованиях больших систем и проектировании дискретных устройств автоматики, в защите и передаче информации, в управлении организационно-экономическими системами, в математической лингвистике и языках программирования. В книге изложены основы теории множеств и отношений, общей и булевой алгебры, комбинаторики и математической логики, теории графов, алгоритмов и автоматов. Основные разделы изложены для «четких» и «нечетких» множеств и отношений. В каждом разделе приводятся многочисленные примеры.

Книга сопровождается вычислительными алгоритмами по всем разделам и будет полезна инженерам различных специальностей при проектировании и управлении технологическими процессами и их информационном обеспечении. Особый интерес она представляет для студентов университетов при изучении таких разделов дискретной математики, как «теория графов», «математическая логика», «теория алгоритмов» и «теория автоматов».

