

Е. А. НЕЛИН, канд. техн. наук, доц.

НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТОК

Проведен обзор результатов по разработке нанозлектронных устройств на основе сверхрешеток (СР). Рассмотрены основы физических явлений, используемых в устройствах, а также особенности технологии СР.

Для современных интегральных схем характерны размеры элементов порядка микрометра параллельно поверхности и порядка десятых и сотых долей микрометра в глубину от поверхности. Так, разработанный в 1991 г. фирмой Intel самый мощный микропроцессор семейства i860, модель 860XP, имеет следующие параметры: минимальный размер элемента 0,8 мкм, число транзисторов более 2,5 млн, тактовую частоту 40...50 МГц, вычислительную мощность 100 млн операций с плавающей запятой в секунду [1].

Дальнейшее уменьшение минимальных размеров ограничивается значениями, приблизительно равными 0,25 мкм, при которых традиционные приборы перестанут функционировать – электроны просто туннелируют сквозь барьер и поток их становится неуправляемым.

Одновременно с совершенствованием традиционных решений в рамках сверхбольших и ультрабольших (с числом элементов, превышающим 10^6) интегральных схем активно развивается направление, в соответствии с которым характерный размер элементов имеет порядок 10 нм, а туннелирование электронов из эффекта второго порядка превращается в эффект первого порядка. Развитие этого направления, получившего название нанозлектроники, связано с разработкой СР, модулирующих потенциальное поле кристаллической решетки. Такие устройства на гетеропереходах представляют собой периодическое чередование слоев разнородных полупроводников с толщиной слоя, равной приблизительно 10 нм.

Существующие приборы нанозлектроники позволяют надеяться на повышение быстродействия в 10^3 и плотности упаковки в 10^2 раз по сравнению с обычными транзисторами [2].

Сверхрешетки. Резонансное туннелирование электронов. Движение электронов в периодическом поле (например, кристаллической решетке) математически аналогично прохождению электромагнитной волны через периодически неоднородную линию передачи (волновой фильтр) с реактивным характером проводимости. Полосы пропускания фильтра чередуются с полосами непропускания, что соответствует разрешенным и запрещенным зонам энергии для электрона. Фильтрующие свойства подобных периодических систем объясняются интерференцией отраженных волн (для электронов - электронных волн). При выполнении условия $n\lambda = 2a$, где a - период расположения неоднородностей (кристаллических плоскостей); λ - длина волны; n - целое число, отраженные волны складываются в фазе, падающая волна полностью отражается, прошедшая отсутствует, что соответствует частоте непропускания.

Сверхрешетки создают искусственную периодичность, приводящую к радикальной перестройке электронных свойств полупроводника. На рис.1 показана зонная диаграмма СП, образованной периодическим чередованием полупроводниковых слоев GaAs и AlGaAs соответственно с меньшей и большей шириной запрещенных зон. Туннелирование электронов через периодические потенциальные барьеры, образованные слоями AlGaAs, приводит к расщеплению зонной структуры однородного полупроводника на наборы минизон 1 и 2 соответственно в зоне проводимости и валентной зоне (E_c и E_v - энергетические уровни дна зоны проводимости и потолка валентной зоны). Положение и ширина минизон зависят от соотношения толщин полупроводниковых слоев.

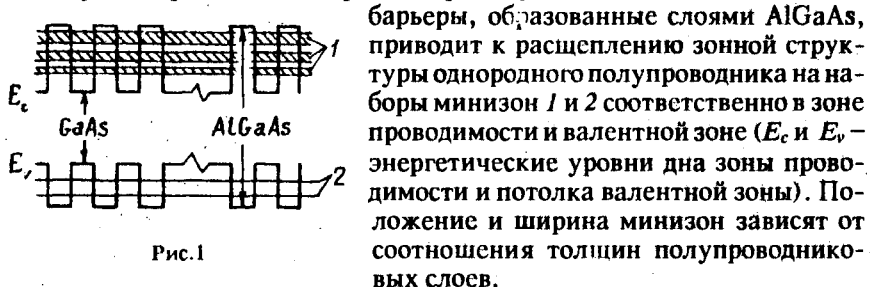


Рис.1

При «квантовых» размерах электроны проявляют свои волновые свойства. Электрон занимает дискретный уровень, и если место его пребывания (потенциальная яма, образованная слоем GaAs) ограничено размерами, кратными половине длины его волны, резонирует, как и электромагнитная волна в резонаторе. Поскольку при комнатной температуре длина волны в GaAs равна 20 нм, слой толщиной в 10 нм соответствует указанному условию.

Функционирование устройств, использующих СП, основано на резонансном туннелировании электронов (РТЭ). На рис.2,а показан двойной потенциальный барьер, ограничивающий центральную узкую потенциальную яму с двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 ; E_F - уровень Ферми. При совпадении энергии падающих электронов с одним из уровней $E_{1,2}$ (рис.2, б) наблюдается РТЭ с коэффициентом прозрачности, близким к единице [3,4]. В этом случае отраженные изнутри волны контрфазно интерферируют с падающей волной и по-

гашают ее так, что остается лишь прошедшая волна. Это резонансное условие распространяется и на случай периодической барьерной структуры.

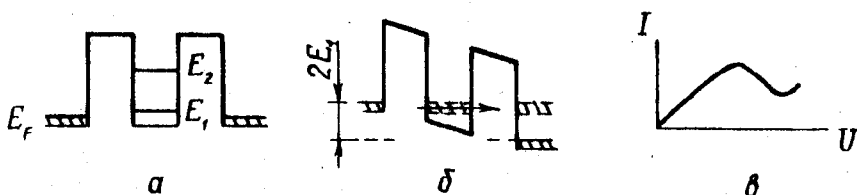


Рис.2

Рассеяние электронов нарушает когерентность электронных волн и условие их интерференции, что уменьшает вероятность РТЭ. Эта вероятность, а также значение резонансного туннельного тока еще в большей степени зависят от неидентичности по площади входного и выходного барьеров. Неидентичность барьеров приводит к неодинаковости амплитуд интерферирующих электронных волн, что уменьшает амплитуду суммарной электронной волны в квантовой яме и коэффициент прозрачности.

Особенности квантового переноса через СР [5] — уменьшение паразитных емкостей [6] и, вследствие ограничения в распределении энергий и скоростей электронов, — уровни дробового шума [7], обусловленного случайностью числа носителей тока и значений их параметров.

Уравнение Шредингера для СР с постоянной или линейной зависимостью потенциала решается аналитически, для произвольной зависимости разработан численный метод [8].

Диодные и транзисторные структуры. На рис.2, в показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) двухбарьерной структуры. С ростом напряжения ток достигает резонансного максимума. При дальнейшем увеличении напряжения условия резонанса нарушаются и ток уменьшается до минимального значения. Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) позволяет использовать этот прибор — двухбарьерный резонансный туннельный диод (РТД) в таких функциональных схемах, как смеситель или переключатель.

Крутизна участка с ОДС определяет предельную частоту генерации активных СВЧ элементов, которая для рассматриваемого диода теоретически достигает 1...4 ТГц, т.е. в десятки раз больше по сравнению с классическим полупроводниковым элементом с внутренним ОДС — диодом Ганна [9]. Высокая предельная частота определяет и высокое быстродействие при использовании диодов в логических схемах. Важный параметр как СВЧ, так и логических элементов с N-образной характеристикой — контрастность, определяемая отношением максимального и минимального токов. Расчетное значение контраст-

ности в типичном случае приблизительно равно 20, что значительно выше по сравнению с диодом Ганна. Однако достигнутые к настоящему времени практические результаты далеки от теоретически ожидаемых, что обусловлено, очевидно, несовершенством СР и погрешностями моделирования [9].

Так, при уменьшении активной площади РТД на основе GaAs/AlGaAs двухбарьерной структуры от 100 до 16 мкм наблюдается уменьшение контрастности на 12%, а максимального тока — на 40% по сравнению с диодом, площадь активной области которого более 30 мкм [10]. Этот размерный эффект объясняется обеднением поверхностей, ограничивающих активную область диода, и локальными изменениями напряжения в активной области. Экспериментальные значения предельной частоты составляют 75...90 ГГц и не зависят от размеров активной области. При уменьшении ширины барьеров предельная частота возрастает до 200 ГГц.

Ограничение движения электронов потенциальными барьерами не в одном, а в двух направлениях приводит к квантованию соответствующих составляющих импульса: $p_{x,y} = (\hbar/2a_{x,y}) n_{x,y}$, где \hbar — постоянная Планка; a_x и a_y — размеры поперечного сечения квантового провода; n_x и n_y — целые числа. Электроны в квантовом проводе образуют одномерный газ. Снижение размерности электронного газа должно ослабить интенсивность его рассеяния кристаллической решеткой, что приведет к увеличению подвижности и дрейфовой скорости электронов.

Сопротивление СР, содержащей порядка 10^6 квантовых проводов из GaAs и AlGaAs с $a_x = a_y = 5$ нм, за счет ослабления интенсивности рассеяния электронов должно быть меньше сопротивления объемного GaAs [2]. Расчетная ВАХ РТД на основе квантового провода имеет участок с ОДС и контрастность, равную 4, при $a_x = 20$ нм, $a_y = 25$ нм, причем контрастность увеличивается с уменьшением a_x и a_y [11].

В диодах на основе СР типа квантовых точек достигается трехмерная локализация электронных волн, что увеличивает контрастность благодаря значительному, изменению энергетического спектра электронов. В подобных структурах возможно туннелирование между отдельными точками. Матрица квантовых точек, связанных между собой электростатически и не имеющих обычных межсоединений, по-видимому, будет представлять основу наноэлектронной интегральной схемы. Каждая из точек может иметь два состояния, в зависимости от наличия или отсутствия электронов. Электроны могут быть перемещены в любом направлении между соседними потенциальными ямами в режиме РТЭ, путем соответствующего выбора полярности напряжения смещения. В результате между потенциальными ямами образуется зарядовая связь.

Двухбарьерный РТД представляет собой базовую структуру, с помощью которой предполагается преодолеть ограничения используе-

мых ныне приборов путем размещения таких структур внутри обычных полевых или биполярных транзисторов, либо последовательно с ними. В 1987 г. разработан прибор с двумя максимумами тока, представляющий собой интегральную конструкцию, содержащую два параллельно включенных РТД [12]. Прибор можно использовать в качестве логической схемы с тремя состояниями, переключающейся из одного устойчивого состояния в другое с помощью импульса напряжения.

Начиная с 1985 г. предлагались различные конструкции би- и униполярных резонансных туннельных транзисторов (РТТ) [13]. В конце 1988 г. изготовлены первые РТТ, в том числе РТТ с двумя максимумами тока [12, 14].

На рис. 3 показана зонная диаграмма РТТ [14]. Управление током от эмиттера Э к коллектору К осуществляется изменением потенциала в потенциальной яме, имеющейся в базе Б. Совпадение уровня Ферми в базе $E_{FБ}$ с уровнями Ферми в эмиттере $E_{FЭ}$ и коллекторе $E_{FК}$ соответствует условию РТЭ. Модуляция происходит за счет инжекции дырок в базу, легированную примесями p -типа. Таким образом, в РТТ управление осуществляется за счет изменения эффективности туннелирования электронов через СР. Такой транзистор имеет типичное значение коэффициента усиления при комнатной температуре, равное 50; были получены значения коэффициента усиления, достигающие 450. Туннелирование происходит очень быстро: время пролета электронов порядка 1 фс (10^{-15} с) и практически не порождает шумов. Прибор изготовлен способом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

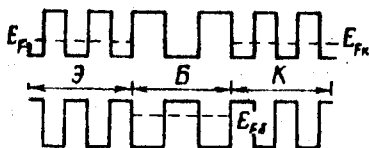


Рис.3

При использовании СР с двумя уровнями энергии в потенциальной яме транзистор имеет два максимума тока. Одно из возможных практических применений такого транзистора — генератор бита контроля четности. В этом случае РТТ заменит 24 обычных полевых транзистора.

На основе СР разработан полностью оптический транзистор [15]. Прибор освещается источником оптического излучения, которое, попадая на многослойное зеркало, отражается от него и создает выходной сигнал. Одновременно на вход подается световой сигнал от другого источника, который вызывает изменение напряжения на транзисторе, что, в свою очередь, изменяет световой сигнал на выходе. Коэффициент усиления равен четырем. На кристалле площадью 3 мм^2 размещено 64 оптических транзистора.

Горизонтальные СР [16] позволяют достигать сверхрешеточных эффектов с помощью планарной технологии. Один из таких эффек-

тов — возможность управления поверхностным потенциалом, действующим на электроны в инверсионном слое МОП-структуры.

На рис. 4, а показана поверхностная МОП-решетка, образованная двумерно-периодической системой затворов 1, погруженных в диэлектрик 2, покрытый электродом 3. Положительное смещение, прило-

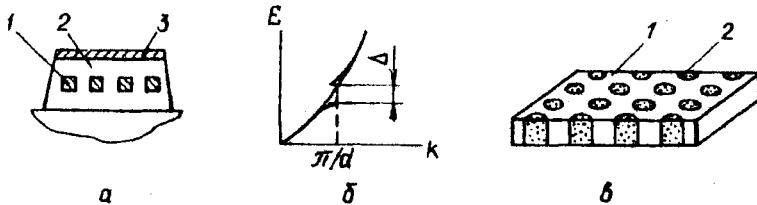


Рис.4

женное к периодической системе затворов, вызывает уменьшение поверхностного потенциала для электронов под электродами затворов. Генерация неосновных носителей, инжекция из МОП- истоков или оптическая накачка создают носители, необходимые для образования под затворами инверсионного слоя.

В дополнение к обычному среднему поверхностному потенциалу на электроны в инверсионном слое действует периодический потенциал СР. Электрод 3 позволяет управлять относительными величинами как среднего потенциала, так и потенциала СР. Эффективный потенциал СР определяется соотношением

$$U(x, y) = U_0 \cos(2\pi x/d) \cos(2\pi y/d),$$

где d — период СР. Вследствие периодичности потенциала решения уравнения Шредингера — волновые функции Блоха $\psi(\xi) = e^{jk\xi} \times r(\xi)$, где $r(\xi)$ — периодическая функция. На рис. 4, б показан энергетический спектр электронов, соответствующий периодическому потенциалу. Здесь Δ — ширина мини-щели между разрешенными мини-зонами. Для создания структуры с разрешенными и запрещенными мини-зонами требуются сравнительно небольшие индуцированные потенциалы СР. В случае Si необходим период $d \approx 10$ нм, а в случае InAs и InSb $d \approx 50$ нм. Вторая возможная структура показана на рис. 4, в. На тонкий эпитаксиальный слой AlGaAs 1 нанесен рисунок с помощью высокоразрешающей фотолитографии. Затем в эпитаксиальном слое вытравливаются углубления 2, в которых способом селективной эпитаксии выращивается монокристаллический GaAs. Электроны прочно связаны с областями GaAs. При высоте потенциального барьера 0,5 эВ и диаметре потенциальных ям 7,5 нм в ямах имеется только по два энергетических уровня. Для расстояния между

потенциальными ямами 15 нм энергетические уровни слабо квантованы и имеют значения 0,164 и 0,318 эВ.

Выбор подходящих материалов и соответствующий уровень технологии обеспечат создание практически полезных горизонтальных СР. Экспериментальные исследования транзисторных структур с высокой подвижностью электронов, где с помощью электронно-лучевой литографии в слое металла затвора создается горизонтальная СР, указывают на наличие ОДС. Теоретически предсказана возможность создания условий инверсии населенности с получением новых рабочих характеристик [16]. Инверсия может быть вызвана оптической накачкой, передачей заряда от прибора к прибору или путем непосредственного туннелирования. Переходы между второй и первой разрешенными мини-зонами через мини-щель могут быть использованы для преобразования оптического или близкого инфракрасного излучения (переход из валентной зоны во вторую мини-зону) в далекое инфракрасное излучение.

Оптические приборы. Сверхрешетки обладают особыми оптическими свойствами, необходимыми для создания высокоэффективных оптических приборов. В отличие от обычных полупроводников, спектр поглощения которых вблизи энергии запрещенной зоны при комнатной температуре имеет гладкую форму и лишен особенностей, у СР обнаруживается последовательность скачков. Эти структуры обладают значительным электрооптическим эффектом (квантово-ограниченный эффект Штарка): при подаче напряжения они меняют свое состояние от матового до совершенно прозрачного.

В легированных СР наблюдается гигантский фотоотклик, что является следствием большого времени жизни носителей заряда [17]. Лазеры на СР GaAs/AlGaAs имеют значительно лучшие характеристики, чем лазеры на двойных гетеропереходах [18, 19]. Соответствующие минимальные значения порогового тока составляют приблизительно 160 и 500 А/см². В лазерных структурах на СР увеличивается вероятность излучательных переходов и уменьшается вероятность захвата носителей тока примесями и дефектами. Кроме того, пороговый ток лазеров на СР значительно слабее зависит от температуры, что, по-видимому, связано с увеличением локализации носителей тока.

Применение СР в оптических усилителях мощности обеспечивает увеличение мощности насыщения по сравнению с обычными объемными полупроводниковыми усилителями. В оптическом усилителе на основе СР достигается уменьшение интермодуляционных искажений на 15 дБ по сравнению с обычными оптическими усилителями, что свидетельствует о преимуществах СР в схемах мультиплексной передачи сигналов с частотным разделением каналов [20]. Активная область усилителя состоит из четырех квантовых ям, образованных слоями InGaAs толщиной 8 нм, и барьеров из InGaAsP толщиной 10 нм. Длина волны, соответствующая максимуму усиления, равна 1,51 мкм, а коэффициент усиления — 12 дБ.

Значительный интерес проявляется к разработке внешнего модулятора длинноволнового инжекционного лазера, используемого в высокоскоростных оптических системах связи. В системах, работающих на длинах волн, соответствующих ненулевой дисперсии световода, частотная дисперсия ограничивает максимальную длину при передаче данных или ширину полосы вследствие межсимвольной интерференции передаваемых данных. В оптических модуляторах на основе СР [21] в силу значительного электрооптического эффекта резонансные длины волн увеличиваются, когда электрическое поле приложено перпендикулярно квантовым слоям. Сверхрешетка такого модулятора имеет 12 периодов и образована слоями InGaAs — квантовые ямы — толщиной 7,5 нм и InAlAs — барьеры — 5 нм. Достигнута низкая частотная дисперсия с шириной полосы модуляции, равной 30 ГГц.

В спектрально перестраиваемых фоторезисторах на основе GaAs/AlGaAs наблюдалось изменение границы поглощения на 40 нм за счет изменения толщины слоев СР [22].

Многие работы посвящены уточнению теоретического анализа устройств на СР. В результате такого анализа лазеров и инфракрасных детекторов с квантовым проводом, в отличие от обычных оценок установлено, что ограничение размерности приводит к увеличению эффективной массы электронов. Так, эффективная масса в квантовом проводе GaAs/AlGaAs с $a_x = a_y = 5$ нм в 1,25 раза больше по сравнению с объемным GaAs.

В последние годы на основе СР создан ряд оптически бистабильных (ОБ) устройств — новых приборов, удобных для применения в оптических компьютерах благодаря их высокому быстродействию и малому энергопотреблению в режиме переключения при комнатной температуре. При ОБ коэффициент поглощения или показатель преломления среды зависит от интенсивности падающего света, что под действием входного сигнала приводит к резкому изменению пропускания от одного устойчивого уровня к другому. Одна из возможных конструкций — введение СР внутрь резонатора Фабри-Перо [24]. Такое устройство можно изготовить по методу МЛЭ, выращивая квантово-размерные слои GaAs/AlGaAs на подложке из GaAs. Затем GaAs-подложка удаляется при помощи селективного химического травления, и на обе стороны СР наносятся диэлектрические зеркала с высоким коэффициентом отражения.

Оптическая бистабильность реализуется в устройстве, использующем самоиндуцированный электрооптический эффект (SEED). СР заключена внутри обедненной области фотодетектора (рис. 5, а) и образована приблизительно 100 слоями с общей толщиной около 1 мкм. Для модулирования коэффициента пропускания светового луча на диод подается обратное напряжение смещения. Рабочее напряжение составляет 5...10 В. При включении устройства во внешнюю цепь возникает оптоэлектронная обратная связь, которая может быть как положительной, так и отрицательной. При положительной обратной

связи внешняя цепь должна содержать нагрузочное устройство (например, резистор). В этом случае при сильной освещенности генерируемый фототок вызывает большое падение напряжения на нагрузке, уменьшая тем самым электрическое поле на СР, что, в свою очередь, вызывает увеличение поглощения. В результате возрастает фототок, пока устройство не станет совершенно непрозрачным. Для поддержания непрозрачного состояния достаточно очень малой энергии входного светового сигнала. Экспериментально полученное время переключения — около 100 пс с фундаментальным пределом, по-видимому, менее 1 пс [24]. Базовая структура SEED реализована также в интегральном исполнении.

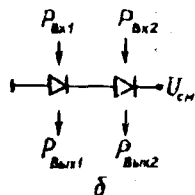
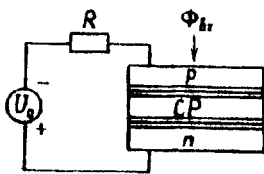


Рис.5

На рис. 5, б показан симметричный SEED (S-SEED), представляющий собой последовательное соединение двух приборов (диодов) с обратным смещением. Каждый диод служит нагрузочным резистором для другого диода. В одном устойчивом состоянии левый диод находится в области сильного поглощения и все напряжение смещения приходится на правый диод. При достаточно большой мощности $P_{вх2}$ в правом диоде он начинает вырабатывать больший фототок, чем левый диод, и напряжение на нем начинает падать, что вызывает увеличение поглощения в правом диоде и уменьшение в левом, а следовательно, дальнейшее увеличение разницы токов, приводящее к переключению и бистабильности. Зависимость от соотношения интенсивностей, а не от абсолютных интенсивностей входных пучков делает работу прибора менее критичной. Устройство переводится в устойчивое состояние сигналом небольшой мощности, а при считывании выдает большую мощность, обеспечивая полезное усиление в тактируемой схеме. Благодаря своей простоте SEED легко интегрируется с другими устройствами.

На основе S-SEED изготовлен первый полностью оптический процессор [25]. В каждом из четырех кристаллов с размером стороны, равным 1,3 мм, выполнена матрица из 32 S-SEED. Матрицы связаны между собой линзами и масками, которые выполняют роль соединяющих элементов. Маски представляют собой стеклянные пластинки с нанесенным на них регулярным рисунком из прозрачных и непрозрачных участков, определяющим логику работы процессора.

Для повышения функциональности SEED в состав устройств могут вводиться и транзисторы [26]. Экспериментально выполнен SEED на полевых транзисторах (F-SEED). Полевые транзисторы формировались непосредственно на верхнем слое структуры модулятора. При

изменении напряжения на стоке полевого транзистора изменяется напряжение также над модулятором непосредственно вблизи стока или под ним. Таким образом получается оптический «выходной контакт» полевого транзистора. На рис. 6 представлен простой вариант усилителя оптического сигнала, совместимый со стандартной технологией полевых транзисторов с затвором Шоттки. Здесь И, З и С — исток, затвор и сток транзистора; 1, 2 и 3 — световые лучи: управляющий, питания и модулированный.

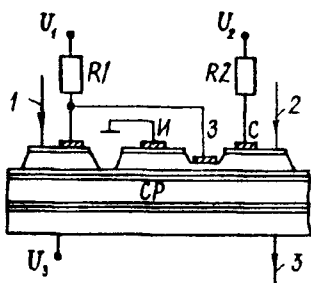


Рис. 6

Устройства SEED удобны для относительно больших цифровых систем, поскольку они могут быть интегрированы с цифровыми устройствами. Рабочие плотности энергии у них сравнимы с плотностью энергии, необходимой для управления хорошими электронными устройствами (1...20 фДж/мкм²) и очень низки по оптическим стандартам. Устройства работают при комнатной температуре, совместимы с полупроводниковыми лазерами и интегральными схемами, могут обеспечивать быстродействие, сравнимое с быстродействием электронных схем.

Возможность интегрирования двумерной матрицы SEED с электронными устройствами открывает перспективу планарной интеграции оптических и электронных элементов. Подобные устройства, согласно последним данным, могут изготавливаться на кремниевых подложках совместно с электронными устройствами, что значительно расширяет возможности гибридной цифровой оптики.

Технология сверхрешеток. Идея искусственных периодических структур со свойствами, не существующими в природных веществах, развивающаяся в течение последних десятилетий, наполнилась реальным содержанием лишь после разработки в начале 50-х годов молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в своей основной форме, позволившей изготавливать строго периодические искусственные структуры с заранее заданными параметрами слоев. Большинство исследованных к настоящему времени CP выращены способом МЛЭ. В последнее время наряду с МЛЭ используется химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений (ХОПФМС). Современный уровень развития эпитаксии позволяет осаждать слои толщиной 2 нм с монокристаллической границей между ними [27].

Молекулярно-лучевая эпитаксия представляет собой процесс эпитаксиального роста тонких слоев различных соединений за счет химических реакций между термически (с помощью электронного луча) создаваемыми молекулярными или атомными пучками соответствующих компонентов и поверхностью подложки, в сверхвысоком вакууме при повышенной температуре [28]. Технология характеризуется малой скоростью роста (около 1 мкм/ч или один атомный слой в секунду).

Молекулярно-лучевая эпитаксия представляет собой процесс эпитаксиального роста тонких слоев различных соединений за счет химических реакций между термически (с помощью электронного луча) создаваемыми молекулярными или атомными пучками соответствующих компонентов и поверхностью подложки, в сверхвысоком вакууме при повышенной температуре [28]. Технология характеризуется малой скоростью роста (около 1 мкм/ч или один атомный слой в секунду).

Молекулярно-лучевая эпитаксия представляет собой процесс эпитаксиального роста тонких слоев различных соединений за счет химических реакций между термически (с помощью электронного луча) создаваемыми молекулярными или атомными пучками соответствующих компонентов и поверхностью подложки, в сверхвысоком вакууме при повышенной температуре [28]. Технология характеризуется малой скоростью роста (около 1 мкм/ч или один атомный слой в секунду).

ду); возможностью резкого прерывания и возобновления роста; возможностями введения различных парообразных компонентов для изменения состояния слоя; наличием атомарно гладкой поверхности растущего кристалла; возможностями анализа в процессе роста. В сверхвысоком вакууме создаются молекулярные пучки с помощью эффузионных ячеек, температуры которых, определяющие интенсивности пучков, тщательно контролируются, как правило, с использованием ЭВМ. От выбора температур подложки и ячеек зависит химический состав эпитаксиальных пленок. Однородность состава пленки и ее кристаллическая структура определяются однородностью молекулярных пучков по площади подложки.

При традиционном способе МЛЭ, проводимой при температуре 600...700° С, диффузия примеси в процессе роста может значительно ухудшить характеристики приборов. По этой причине температуру процесса необходимо снижать. Однако при низких температурах невозможно получать пленки GaAs с совершенной структурой. Если при наращивании пленок заслонки ячеек As и Ga открывать попеременно, поверхностная диффузионная длина атомов Ga становится значительной при низких температурах, что позволяет уменьшить температуру эпитаксии до 120° С [29]. Кроме того, пленки легируют индием, небольшие добавки которого снижают плотность дефектов и ловушечных центров в GaAs, улучшая электрические свойства GaAs- пленки *n*-типа. Третье условие — малая скорость наращивания. Поскольку при низких температурах подвижность атомов Ga уменьшается, быстрое наращивание пленок в этих условиях ведет к образованию большой плотности дефектов. Ячейки элементов открыты в течение 10 (Ga) и 2 (As) с, скорость потока 0,1 мкм/ч.

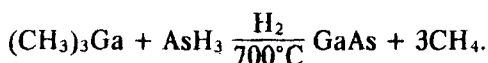
Для контроля параметров роста пленок при МЛЭ используются отражательная дифракция быстрых электронов, электронная спектроскопия, масс-спектроскопия вторичных ионов и другие методы. Большинство исследовательских и значительная часть технологических установок МЛЭ содержат необходимое аналитическое оборудование.

Особенностью технологии ХОПФМС является то, что к металл-органическим соединениям относится широкий класс веществ, содержащих металл-углеродные и металл-кислород-углеродные связи. Кристаллизация в процессе ХОПФМС осуществляется при пропускании однородной паровой смеси реагентов с газами-носителями над нагретой подложкой в реакторе с холодными стенками. Тщательно контролировать необходимо лишь температуру подложки, причем вследствие малой чувствительности к температуре большинства параметров пленок, получаемых этим методом, небольшие изменения температуры не оказывают влияния.

Высокоточное управление парциальным давлением различных компонентов осуществляется с помощью электронной системы, контролирующей скорость потока от каждого из источников, чем обеспечивается воспроизводимость результатов.

Металлорганические соединения, используемые для выращивания полупроводниковых пленок, при комнатной температуре в большинстве своем — жидкости. Эти вещества легко доставляются в зону реакции путем пропускания газа-носителя, например H_2 , через жидкость. Metallорганические соединения в паровой фазе и небольшие гидридные добавки в газовой фазе к H_2 , необходимые для роста полупроводниковых пленок, смешиваются и пиролизуются в потоке H_2 . Температура пиролиза, как правило, составляет $600...800^\circ C$. Энергия для нагревания смесей обычно создается мощным радиочастотным генератором с частотой около 450 кГц. Генератор нагревает графитовый держатель, на который помещена монокристаллическая подложка. Вблизи поверхности подложки смесь нагревается до высоких температур, а стенки камеры остаются холодными. Вследствие этого полупроводниковая пленка осаждается на кристаллическую подложку при малых потерях реагирующих веществ на поверхности реактора.

Для конкретного случая ХОПФМС с использованием триметилгаллия и AsH_3 результирующая химическая реакция записывается в виде [28]



С помощью аналогичных реакций выращиваются тонкие пленки и других соединений, например $AlGaAs$.

К настоящему времени технология ХОПФМС не отработана в такой степени, как МЛЭ, что ограничивает характеристики СР, получаемых этим методом. МЛЭ, по-видимому, будет доминирующей технологией в фундаментальных исследованиях СР, а ХОПФМС — в производстве и исследовании приборов [28].

В последнее время достигнут большой прогресс в развитии методов исследования границ слоев выращенных СР на основе взаимосвязи оптических и структурных свойств СР и их зависимости от параметров эпитаксиального роста [30]. При этом используется люминесценция и электронная микроскопия в проходящих лучах. Люминесценция относится к наиболее чувствительным из методов неразрушающего анализа как внутренних, так и внешних свойств СР.

Развитие технологии СР, методов исследования их структурных, оптических и электрических свойств, а также электроники полупроводниковых приборов на основе СР позволит использовать чрезвычайно большие потенциальные возможности сверхрешеточных структур.

Список использованной литературы

1. Берски Д. Новый микропроцессор, содержащий несколько миллионов транзисторов и обладающий вычислительной мощностью суперкомпьютера // Электроника. 1991. № 11—12. С. 3,4. 2. Уоллер Л. Квантовая решетка — новый путь создания сверхмалых ИС // Там же. 1989. № 4. С. 9. 3. Эсаки Л. Путешествие в страну туннелирования // Успехи физ. наук. 1975. Т. 116, вып. 4. С. 569—583. 4. Тагер А.С. Размерные квантовые

эффекты в субмикронных полупроводниковых структурах и перспективы их применения в электронике СВЧ. Ч. 1. Физические основы // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 9(403). С. 21—34. 5. *Tsuchiya H., Ogawa M., Miyoshi T.* Simulation of quantum transport in quantum devices with spatially varying effective mass // IEEE Trans. on Ed. 1991. Vol. 38, №6. P. 1246—1252. 6. *Ganoë J., Hoff C.V., Roy W.V. et al.* Capacitances in double-barrier tunneling structures // Ibid. 1991. Vol. 38, №9. P. 2006—2012. 7. *Han J., Barnes F.S.* A theory of shot noise in quantum wells and applications in resonant tunneling hetero junction bipolar transistors // Ibid. 1991. Vol. 38, №2. P. 237—242. 8. *Nakamura K., Shimizu A., Koshiba M., Hayata K.* Finite-element analysis of the miniband structures of semiconductor superlattices with arbitrary periodic potential profiles // IEEE J. Quantum Electron. 1991. Vol. 27, №8, P. 2035—2041. 9. *Долгачев И.Н., Толстухин В.И., Еленский В.Г.* Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием электронов // Зарубеж. радиоэлектроника. 1990, №7. С. 66—89. 10. *Schnell R.D., Tews H.* Size effects in microstructured resonant tunneling diodes // Solid-state electronics. 1990. Vol. 33, №11. P. 1467—1470. 11. *Weisshaar A., Lary J., Goodnick S.M., Tripathi V.K.* Negative differential resistance in a resonant quantum wire structure // IEEE Electron. Device Lett. 1991. Vol. 12, №1. P. 2—4. 12. *Уэбер С.* Перспективы новых поколений ИС-приборов на квантовых эффектах // Электроника. 1988, №20. С. 83—89. 13. *Тагер А.С.* Размерные квантовые эффекты в субмикронных полупроводниковых структурах и перспективы их применения в электронике СВЧ. Ч. 2. Резонансно-туннельные диоды и транзисторы // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 2(406). С. 17—33. 14. *Тилл Д.* Квантово-туннельный транзистор побивает рекорды миниатюрности и быстродействия // Электроника. 1989, №2. С. 6. 15. *Оптический транзистор фирмы NTT* // Радиоэлектроника за рубежом, экспресс-информация. НИИЭИР. 1991. Вып. 23. С. 23. 16. *Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э.* Электроника ультрабольшой интегральной схем: Пер. с англ. М., 1991. 327 с. 17. *Бузарева Е.В.* Микроструктуры интегральной электроники. М., 1990. 304 с. 18. *Данилина О.В., Косых А.Е., Логачев А.С., Пауко С.А.* Мощный квантово-размерный AlGaAs/GaAs инжекционный лазер с широким контактом и остронаправленной диаграммой направленности // Квантовая электроника. 1991. №11. С. 1313—1314. 19. *Rosenzweig M., Mohrle M., Duser H., Venghaus H.* Threshold-current analysis of InGaAs—InGaAsP multi-quantum well separate-confinement lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1991. Vol. 27, № 6. P. 1804—1811. 20. *Chung Y.C., Wiesenfeld J.M., Raybon G. et al.* Intermodulation distortion in a multiple-quantum-well-semiconductor optical amplifier // IEEE Photon. Technol. Lett. 1991. Vol. 3, №2. P. 130—132. 21. *Wakita K., Kotaka I., Mitomi O.* Observation of low-chirp modulation in InGaAs—InAlAs multiple-quantum-well optical modulators under 30GHz // Ibid. P. 138—140. 22. *Youn H.J., Darling R.B., Kuhn K.J.* AlGaAs—GaAs multiple quantum-well spectrally tunable photoconductors // Ibid. P. 159—161. 23. *Yamanouchi T., Takahashi T., Arakawa Y.* Tight binding analysis for quantum-wire lasers and quantum-wire infrared detectors // IEEE J. Quantum Electron. 1991. Vol. 27, №6. P. 1817—1823. 24. *Нефц Дж.А., Атхале Р.А., Ли С.Х.* Двумерные пространственные модуляторы света: Метод. обзор // ТИИЭР. 1990. Т. 78, №5. С. 29—58. 25. *Цифровой оптический процессор* // Радиоэлектроника за рубежом, экспресс-информация. НИИЭИР. 1990. Вып. 13. С. 20, 21; Вып. 17. С. 14, 15. 26. *Штрайбль П., Бреннер К.-Х., Хуан А. и др.* Цифровая оптика // ТИИЭР. 1989. Т. 77, №12. С. 179—196. 27. *Ижнин И.И., Гаврилюк Ю.Н.* Эпитаксиальные методы выращивания GaAs // Зарубеж. электрон. техника. 1991. Вып. 10—11. 28. *Херман М.* Полупроводниковые сверхрешетки: Пер. с англ. М., 1989. 240 с. 29. *Низкотемпературное выращивание высококачественных арсенид-галлиевых пленок* // Радиоэлектроника за рубежом, экспресс-информация. НИИЭИР. 1990. Вып. 20. С. 15. 30. *Herman M.A., Bimberg D., Christen J.* Heterointerfaces in quantum wells and epitaxial growth processes: evaluation by luminescence techniques // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70, №2. P. 1—52.

Поступила в редколлегию 18.02.92