

ОТ ГЕТЕРО ЛАЗЕРА ДО КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА.

*Палагин А.В., Осинский В.И., Мержвинский А.А., Осинский А.В.,
Золотопуп А.И., Ходаковский Н.И.*

г. Киев, Украина

Современный уровень исследований в области гетероэлектроники позволяет говорить о магистральном направлении создания устройств вычислительной техники для актуальных задач информатизации общества. В настоящей работе предложены физико-технологические аспекты создания вычислительных и запоминающих сред в гетерогенных полупроводниковых системах с нанометровыми квантоворазмерными точками и двумерным электронным газом. Методы компьютерного управления потоками атомов и молекул в процессах эпитаксиального роста позволяют формировать полупроводниковые наноструктуры с вычислительной способностью, на несколько порядков превышающей традиционные транзисторные элементы. Указанные методы дают возможность постановки задачи о построении квантового компьютера. Возможны два подхода при создании квантового компьютера: использование квантовых элементов в традиционных компьютерах и применение принципов квантовой механики для вычислений. Ниже будет рассмотрен примененный нами ранее подход использования для параллельных вычислений в твердых квантовых гетерогенных средах двумерных электронных потоков вместо традиционных оптических лазерных сигналов. При этом существенно возрастает эффективность решения задач, связанных с обработкой микро- и наноизображений. В работе проводится также ретроспективный анализ вклада отечественных специалистов в технологию гетероэлектроники и перспективы развития этого направления в Украине.

1. Квантовые компьютеры.

Возможны два подхода применения принципов квантовой механики для вычислений:

1. Применение квантовомеханических компонентов в обычных архитектурах компьютеров.
2. Создание компьютера на квантовомеханических принципах.

Для реализации квантового компьютера в обоих подходах обычно используют оптику, которая удобна для создания в пространстве параллельных структур[1]. Классическим примером первого подхода при создании квантового компьютера является преобразование картин в когерентных оптических вычислителях. Во втором варианте используются генетические алгоритмы, с помощью которых генерируется картинновостановительная маска. Корпускулярно-волновой дуализм квантовой механики состоит в невозможности однозначно предсказать результаты в числовом или вероятностном смысле.

Классические опыты с прохождением фотонов через две щели, описанные в [2], показывают возможность получения ответа без проведения многочисленных промежуточных операций. Известно, что эффективность обычных компьютеров (суперкомпьютеров) ограничивается проблемами диссипации тепла. Теоретически каждая операция бинарного вентиля требует затрат энергии по крайней мере $kT \ln 2$. Используя математические методы, называемые генетическими алгоритмами, возможно определять новые рецепторы (геномы) и путем сравнения измерять конечный результат, без участия физических логических вентилях. Просто детектируется ответ от выбранных родителей. В этом случае энергия на вентиль существенно ниже теоретического предела $kT \ln 2$. В квантовых оптических компьютерах все пиксели работают параллельно, что существенно повышает быстродействие системы, уменьшает потребляемую энергию, повышает точность и надежность.

Оптические когерентные компьютеры применяются в тех областях, где необходимо выполнять большие объемы вычислений, не требующих высокой точности. В них достигается скорость 10^{12} - 10^{14} бит/с, недостижимая обычными микроэлектронными методами при экономически оправданных затратах. В классических вычислителях применяются газовые лазеры, обладающие высокой временной и пространственной когерентностью. Диаметр светового пучка источника удовлетворяет соотношению

$$d_0 = 1,22 \lambda_c f,$$

где λ_c - длина волны света, f - фокусное число, равное отношению фокусного расстояния к апертуре. На входе оптического компьютера располагается пространственно-временной модулятор. На выходе оптического компьютера (ОК) устанавливается матрица фотоприемников, преобразующая свет в токовые сигналы. Основными элементами ОК являются оптические линзы, которые выполняют следующие математические процедуры:

- одно- или многоканальный анализ спектра в одном или двух измерениях;
- одно- или многоканальная пространственно-частотная согласованная фильтрация;
- корреляция.

В оптической линзе происходит двумерное Фурье-преобразование распределения амплитуды света, которое описывается уравнением:

$$E_2 (\omega_x, \omega_y) = C_0 \iint E_1 (x_1, y_1) \exp [-j (\omega_x x_1 + \omega_y y_1)] dx, dy,$$

где E_1 и E_2 - распределения амплитуды электрического поля во входной и выходной плоскостях соответственно,

ω_x и ω_y - угловые пространственные частоты, которые связаны с координатами выходной плоскости $\omega_x = 2\pi x_2 / \lambda F$, $\omega_y = 2\pi y_2 / \lambda F$, где F - фокусное расстояние. В некогерентных оптических компьютерах используется распределение интенсивности протяженных источников света. Они не могут осуществлять пространственно-частотную фильтрацию, однако для операций

пространственно-частотной корреляции они часто оказываются более простыми, чем когерентные.

Принципиальные преимущества оптических компьютеров: параллельность работы, представление данных в виде двумерных образов, коммутация в свободном пространстве зачастую не конкурентоспособны в полной мере из-за высокого технологического уровня полупроводниковых СБИС. Поэтому наибольший эффект достигается в системах, в которых оптика используется только для коммутации. Архитектура таких систем основана на таких принципах массовой обработки, как вычислительные среды, клеточные структуры, систолические матрицы. В сочетании с коммутацией в свободном пространстве получается новое качество - сверхвысокая производительность. Однако в технологическом плане они существенно уступают методам микроэлектроники.

Основные принципы построения оптических компьютеров хорошо отработаны с использованием газовых лазеров или других источников света. Однако последние достижения гетероэлектроники [3,6], позволяющие создавать точечные источники света и электронов с высокими оптическими и временными параметрами позволяют использовать высокие технологии микро- и нанoeлектроники для построения вычислителей, конкурентоспособных с транзисторными микропроцессорами не только по скорости вычислений, а и по всем технико-экономическим показателям.

2. Гетеролазерные и квантоворазмерные технологии.

Для современной информационной техники характерны два магистральных направления построения вычислительных устройств: на основе транзисторных элементов кремниевой микроэлектроники и на основе принципов гетероэлектроники [3], ключевыми элементами которой являются гетеролазеры [4], имеющие сейчас такое же революционизирующее значение в технологиях обработки сигналов, как в свое время имели транзисторы, микросхемы и микропроцессоры.

Идея использования в полупроводниковых лазерах гетеропереходов принадлежит Ж.И.Алферову и Р.Ф. Казаринову [7], которые в 1962 г. в ФТИ им.А.Ф.Иоффе изобрели двойную гетероструктуру.

С того времени начались интенсивные разработки новых структур и материалов для лазеров, светодиодов и других приборов на гетероструктурах. Основным физико-технологическим принципом создания качественных гетероструктур является совпадение параметров кристаллической решетки эпитаксиальной пленки и подложки, на которой она растет. Наиболее подходящей парой полупроводниковых материалов оказались арсенид галлия и твердый раствор арсенида галлия-алюминия, излучающих в ближней инфракрасной и прилегающей красной областях спектра [3]. Однако уровень технологии того времени не позволял получить лазеры, работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме. Проводились интенсивные поиски других материалов и исследования тепловых процессов в излучающих структурах. В начале 60-х годов нами проводились сравнительные исследования температурных зависимостей излучательной рекомбинации арсенида галлия и

фосфида индия, выращенных методом Бриджмена. В нашей лаборатории было показано, что эти материалы образуют непрерывный ряд твердых растворов. Гомогенизируя состав твердых растворов методом очень медленной зонной перекристаллизации нами были выращены кристаллы арсенида-фосфида галлия-индия пяти составов сечения GaAs-InP [8]. После многодневной перекристаллизации получались легированные теллуром кристаллы n-типа, рентгенодифракционные исследования которых подтверждали гомогенность, однако дифракционные полосы были более широкими по сравнению с бинарными соединениями. Р-n-переходы создавались диффузией цинка в пластинки n-типа. Первые светодиоды на четверных твердых растворах InGaAsP нами были получены в 1964 году. Самым удивительным оказалось то, что интенсивность излучения диодов на InGaAsP зачастую превышала интенсивность аналогичных диодов на арсениде галлия и фосфиде индия, полученных по той же технологической схеме. Средние составы разреза GaAs-InP излучали сильный красный свет, что соответствовало оптическим переходам, существенно превышающим ширину запрещенной зоны, определенную в соответствии с линейной зависимостью правила Вегарда, по которому энергии межзонных рекомбинационных переходов не могут превышать E_g арсенида галлия. Этот феномен был предметом горячей дискуссии в научных кругах: большинство участников семинара в Физическом институте им.Леведева подвергли сомнению эти результаты и вообще целесообразность разработки излучателей на многокомпонентных полупроводниках. Однако руководитель семинара Н.Г.Басов поддержал наши фактические экспериментальные данные, достоверность которых подтверждалась цветными фотографиями области свечения структур, а химический состав - рентгеновскими дифрактограммами. Он призвал участников семинара верить экспериментальным фактам, а их теоретическая интерпретация - дело последующих длительных исследований, которые, кстати, продолжаются и в настоящее время. В то время эту работу также поддержал Ж.И.Алферов, который отнес красное свечение средних составов твердых растворов за счет их микронеогомогенности. Спустя 15 лет, в 1981 г., используя современное понимание квантоворазмерных эффектов в квантовых ямах, мы объяснили высокоэнергетический сдвиг квантованием уровней в таких гетерогенных полупроводниках [6]. Характерно, что именно в многокомпонентных материалах, имеющих 4- или более сортов атомов существенно различающихся по своим физико-химическим свойствам в условиях естественной кристаллизации образуются квантовые ямы, квантовые точки, квантовые проволоки, оптические микрообъемы (cavity) и фотонные кристаллы, распределение которых по объему определяется термодинамическими процессами самоорганизации этих нано- и микроструктур. Впервые лазерный эффект в многокомпонентной системе InGaAsP был получен в нашей лаборатории в 1965 году [9]. В дальнейшем, используя жидкофазную и МОС-гидридную эпитаксии составов, изопериодических к фосфиду индия, на основе твердых растворов InGaAsP были разработаны лазерные и фотоприемные элементы на длины волн 1,3 и 1,55 мкм для волоконно-оптических линий связи, в том числе для сверхскоростных

компьютерных сетей. Современные гетеролазеры на основе InGaAsP или других материалов представляют собой многослойные структуры с активной областью с электронным и оптическим ограничением, создаваемым соответствующим выбором составов слоев. Полностью освоены видимый и инфракрасный диапазоны. Успешно разрабатываются лазерные диоды на основе селенида цинка и нитрида галлия для сине-зеленой и фиолетовой областей спектра. Квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки представляют собой примеры квантования состояний электронов в двумерном (2D), одномерном (1D) нульмерном (0D) пространстве соответственно.

В 1981 г. нами [6] впервые проведена классификация гетерогенных материалов в зависимости от размеров r микро-, нанообластей с одинаковой шириной запрещенной зоны:

- $r \approx (3-10) \text{ а } \approx (1,5 - 5) \text{ нм}$ - квазигомогенные твердые растворы; в современном понимании это гетероструктуры с квантовыми точками;

- $r \approx (20-50) \text{ а } \approx (10-30) \text{ нм}$ - "сверхрешеточные" гетерогенные твердые растворы; в современном понимании это гетероструктуры с квантовыми ямами;

- $r \approx I_{\text{ф}} = 0,1-10 \text{ мкм}$ - оптически гетерогенные твердые растворы; в современном понимании это фотонные материалы .

Выделение оптически гетерогенных полупроводников с размерами микрообластей порядка длины волны фотонов впоследствии [10] рассматривалось рядом авторов как структуры с микрообъемами, ограничивающими (удерживающими) фотоны (optical wavelength - scale structures or microcavities: confined photons). Такие материалы получили название фотонных материалов, PBG (Photonic bandgap materials) [11,12]. В этих материалах можно реализовывать квантовый выход фотонов близкий к 100%, что позволяет создавать светодиодные структуры с рекордно высокой эффективностью преобразования электрической энергии в оптическую и строить на их основе функциональные оптоэлектронные элементы обработки и передачи информации. Получение квантовых нитей и квантовых точек требует сочетания как эпитаксиальных процедур, формирующих одну из координат наноструктуры так и литографических процессов, ограничивающих наноструктуры в других направлениях [13]. Для формирования квантовых нитей применяется специальная обработка естественных поверхностей: поверхностные структуры, суперступени, поверхности с высокими индексами или искусственно созданные поверхностные наноструктуры (V-канавки, маскирование поверхности для селективного роста, боковое скалывание гетероструктур. Для квантовых точек наиболее распространенной методикой является выращивание их на поверхности GaAs, маскированной двуокисью кремния. Однако сверхвысокие требования к литографическим процессам ограничивают применение этой методики. Интересной является использование мод роста Странского-Крастанова в сильно напряженных слоях InAs на GaAs. В этом случае происходит самоорганизация зародышей и можно вырастить матрицу квантовых точек и квантовых нитей [14,15], для чего необходимо в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии технологически перейти от двумерной моды роста (2D) к трехмерной (3D). Такие структуры получены на системах InAs/GaAs, Ge/Si, CdSe/ZnSe. Если в микрообъеме с размерами

порядка длины волны света, вернее $1/4\lambda$, разместить ансамбль атомов излучающих свет, реализуется одномодовый светодиодный режим, который обладает когерентными свойствами лазеров, но имеет большую надежность и не имеет порога генерации. Такие светодиоды имеют скорости модуляции более 10 ГГц и дифференциальную квантовую эффективность более 50%, что соизмеримо с лазерами. Фактически в таком микрообъеме (microcavity) теряется разница между светодиодом и лазером и становится реальностью беспороговый лазер. Эффект генерации света из микрообъема гетерогенных пленок InGaAsP выращенных на GaAs подложках мы наблюдали в 1980 г., и описали в 1995 г [19], при исследовании их фотолюминесценции, возбуждаемой аргоновым лазером. Хаотически расположенные микрообласти в различных точках пленки генерировали узкие спектральные линии, порядка десяти ангстрем шириной. Однако в регистрации патента на такой лазер нам было отказано. Сейчас теоретические исследования локализации фотонов в микрообластях гетероструктур не вызывают сомнений в лазерном эффекте в них, а уровень технологии позволяет создавать локальные микро- и наноструктуры любых размеров и энергетических зазоров.

Последнее время интенсивно развивается электронная оптика в конденсированных средах [16]. В квантоворазмерных структурах существует четкая аналогия между оптикой и электроникой [17]. Распространение электронов в НЕМТ - двумерном канале представляет собой электронный волновод [39]. Возможна коллимация моноэнергетических электронных пучков, фокусирование и отражение электронов. Туннелирование электронов через барьер эквивалентно прохождению волн в оптике.

Электронный резонатор Фабри-Перо фактически реализуется в двухбарьерном резонансном туннельном диоде. Наблюдается и обратная аналогия, например, прохождение квантов света через узкую апертуру [19] и изобретение фотонных материалов [11]. Хотя корпускулярно-волновой дуализм электронов давно используется в вакуумных лампах и электронных микроскопах, манипуляции с электронами в конденсированных средах весьма перспективны в микроэлектронике. Волновое и баллистическое поведение электронов в полупроводниковых, особенно в гетерогенных, материалах представляет дополнительные возможности интеграции в микроэлектронике.

Процессы электронной литографии [20] фактически предназначены для создания микро- и наноструктур на поверхности и в объеме полупроводника для ограничения движения электронов в нежелательных направлениях и их транспорта в выбранных направлениях, манипуляции с которыми осуществляются внешними потенциалами через фиксированные структуры микросхемы. При этом поток электронов рассматривается как непрерывный континуум частиц, без учёта их волновых свойств, которые, по аналогии с оптикой, определяют предельную разрешающую способность вакуумных электронных систем (микроскопов, электронных литографов).

Волновая природа электрона и использование конечных апертур α для ограничения ширины электронного пучка приводят к расходимости пучка, прошедшего объект (дифракционная ошибка). Радиус кружка нерезкости, обусловленный дифракцией при малых углах равен

$$r_g = \frac{0,61\lambda_0}{\alpha},$$

где λ_0 - длина волны де Бройля. Предельное разрешение δ ограничивается сферической и дифракционной ошибками и может быть выражено через длину волны электрона и постоянную сферической аберрации C_{sf} ;

$$\delta_{мин} = A \lambda_0^{3/4} C_{sf}^{1/4}$$

Принципиальным ограничением уменьшения величины $\delta_{мин}$ является дефокусировка, достигающая длины волны электрона, которая равна нескольким ангстремам. Используя электронные волны, можно на несколько порядков повысить пространственную разрешающую способность классических оптических методов обработки информации, которая определяется длиной волны фотонов, в реальных системах 0,2 - 1 мкм.

3. Зонная инженерия квантовых нанопроцессоров.

Анализируя процессы оптоэлектронных преобразований в оптронах [21 - 24] в начале 70-х годов мы предложили проводить функциональную обработку информации в многослойных структурах варизонных полупроводников [24,25]. Идея основана на том, что в варизонном кристалле существует внутреннее электрическое поле, под действием которого происходит движение электронов и дырок, а слои полупроводника способны поглощать и излучать оптические сигналы с различными длинами волн, преобразуя их в поток электронов и дырок, направленный к узкозонной области.

Схема оптических и электронных переходов в кристалле с градиентом запрещенной зоны представлялась некоторым функциональным оптроном, в котором условно можно выделить входную область I, выходную область II, и область передачи, или оптической и электронной связи, III. Схема, приведенная на рис. 1а соответствует оптрону с прямой связью. При измерении входного светового потока Φ_1 изменяется интенсивность генерации электронно-дырочных пар. Неравновесные носители переносятся через область с переменной шириной запрещенной зоны и затем рекомбинируют с излучением в области II, создавая выходной световой поток Φ_2 , амплитуда которого является функцией входного светового потока Φ_1 .

Область электронного дырочного переноса III служит передающей средой и может управляться электрическим полем или светом. Такой оптрон является функциональным усилителем или преобразователем света. В области III могут быть сформированы наноструктуры квантовых нитей, точек, электронные волноводы типа каналов с двумерным электронным газом или электронные линзы и зеркала.

Режим усиления и антистоксовского преобразования можно реализовать в схеме, представленной на рис. 1б. При антистоксовском преобразовании энергия испущенных квантов больше энергии входного сигнала $h\nu_2 > h\nu_1$,

поэтому при определенных условиях происходит усиление мощности. Дополнительная энергия сообщается носителям за счет внешнего электрического поля или градиента концентрации. В этих двух видах функциональных оптронов оптическая связь внешняя.

Для осуществления внутренней оптической связи область передачи не

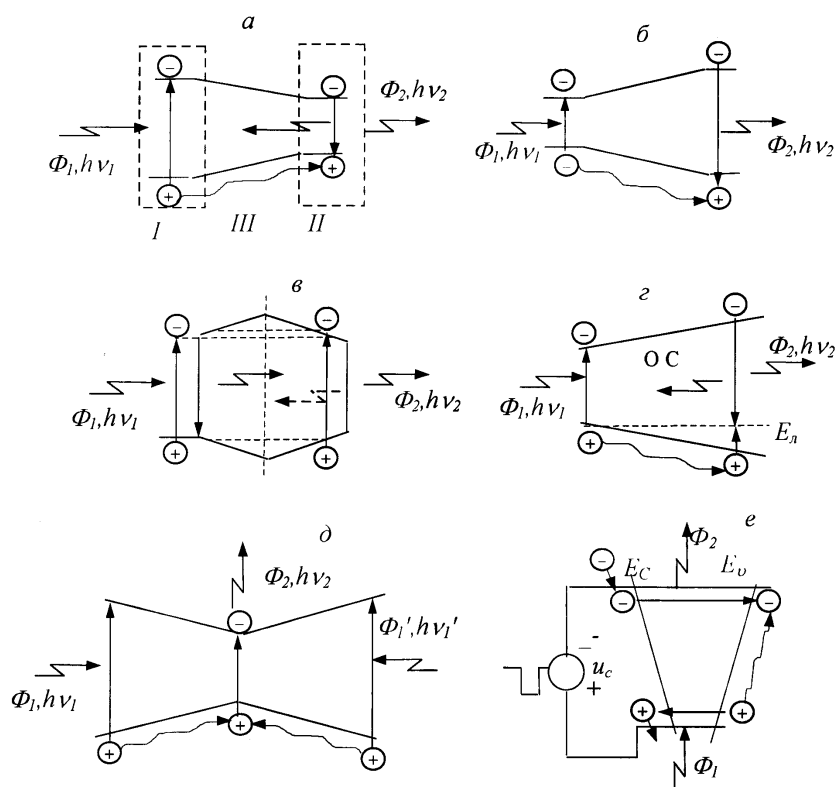


Рис. 1. Оптические электронные (дырочные) переходы в функциональных оптронах на полупроводниках с градиентом запрещенной зоны: а— входная широкозонная сторона; б—входная узкозонная сторона; в—оптическая связь через область передачи с максимумом запрещенной зоны; г—оптическая связь через примесный уровень (уровень ловушек); д— широкозонные области служат оптическими входами, общая узкозонная область - оптическим или электрическим выходом: е—электрическое управление областью передачи.

должна поглощать рекомбинационное излучение возникшее на входе, который электрически развязан с выходом. Схема, приведенная на рис. 1в, показывает возможный вариант осуществления структуры с максимумом запрещенной зоны в области передачи. Толщина области передачи, через которую осуществляется как прямая, так и обратная оптическая связь, составляет несколько диффузионных длин.

Легко заметить, что вариант функционального оптрона с оптической связью (рис. 1 в) является комбинацией оптоэлектронных структур (рис. 1а,б). В области передачи сигнала может быть осуществлена инверсия населенностей. Выбором направления действия связи через стимулирование излучения реализуется как положительная, так и отрицательная оптическая связь.

Оптическая обратная связь может проходить через уровень ловушек (рис.1г). Прямая электронная (дырочная) связь между входом и выходом

оптрона создает в области II избыточную концентрацию неосновных носителей, которые захватываются ловушками и рекомбинируют излучательно с энергией квантов примесной полосы $h\nu_{\text{пр}} = E_c - E_l \geq h\nu_1$. Если реабсорбация примесного излучения происходит в области порядка диффузионной длины, обратная связь носит оптоэлектронный характер.

На рис. 1 д представлена диаграмма оптических и электронных переходов в оптроне, выходом которого является узкозонная область кристалла, а входы могут осуществляться через все широкозонные области.

Все приведенные варианты функциональных оптронов имеют оптические входы и выходы. Однако в элементарном оптроне можно осуществить и электрический вход, если поместить кристалл с градиентом запрещенной зоны между обкладками конденсатора (рис 1 е).

Работа функциональных оптронов на кристаллах с переменной запрещенной зоной сопровождается преобразованием спектра излучения и использованием резкого различия коэффициентов поглощения определенных областей монокристаллической структуры.

Приведенные рассуждения можно распространить на более сложные структуры, в которых одна из областей или все области кристалла с переменной запрещенной зоной содержат квантовые точки или ямы, микролазерные или светодиодные структуры, микро- и нано- фотоприемники любого типа или другие микро- и нано- структуры. Например область передачи в схеме с максимумом запрещенной зоны может содержать i - слой или p - n -переход. Все приведенные на рис. 1 элементарные схемы имеют оптический вход и выход. При введении p - n -переходов или других электронных структур оптроны могут иметь электрические входы и выходы, количество которых определяется реализуемой функцией.

При работе с двумерными информационными потоками существуют две возможности распараллеливания процесса обработки: преобразование изображений в параллельных пространственных каналах и параллельная обработка оптических сигналов с различными длинами волн. В обоих случаях возможна обработка как побитовой, так и аналоговой информации. при цифровой обработке на вход функциональной микроструктуры подается световое поле, содержащее 10^3 - 10^4 бит (страница дискретной информации). При аналоговой обработке на вход поступают пространственные изображения (образы), которые целесообразно обрабатывать на основе ассоциативных принципов аналоговой двумерной линейной обработки когерентных или некогерентных сигналов.

Принципиальным преимуществом функциональной обработки в слоях с переменной запрещенной зоной является возможность преобразования сигналов в реальном масштабе времени, т.е. практически мгновенно за время $\sim 10^{-9}$ - 10^{-8} с.

Ряд задач распознавания образов, управления сложными системами, задачи метеорологии, математической физики можно решить только двумерной и трехмерной обработкой информации в реальном масштабе времени. При этом требуется быстроедействие более 10^6 операций в секунду, которое невозможно реализовать в ЭВМ на транзисторных элементах. Лишь двумерные и трехмерные системы обработки информации в реальном масштабе времени

обеспечивают практически мгновенное преобразование больших массивов информации в виде пространственных изображений.

Допустим, на поверхность пластины полупроводника с градиентом E_g поступает оптический сигнал в виде двумерного пространственного рельефа интенсивности $\Phi_0(x,y)$. В слое dz это световое поле поглощается, генерируя электронно-дырочные пары. Пространственный рельеф интенсивности $\Phi_0(x,y)$ преобразуется в рельеф заряда электронов $Q_n(x,y)$ и дырок $Q_p(x,y)$. Под действием внутреннего тянущего поля пространственные рельефы Q_n и Q_p изменяются в соответствии с функцией преобразования. В простейшем случае допустим, что имеется симметричная структура, аналогичная приведенной на рис. 1 а. В ней из-за амбиполярного дрейфа носителей под действием внутреннего тянущего поля обе картины (электронная и дырочная) будут перемещаться к выходной области, где они складываются. Если все параметры для ансамбля электронов и дырок одинаковы (в пределах погрешности метода), то выходной сигнал будет представлять собой пространственный рельеф, который описывается функцией $\Phi_2(x,y)$, являющейся решением уравнения

$$A_1\Phi_0(x,y) = \Phi_2(x,y),$$

где A представляет собой оператор, т.е. математическое действие, произведенное в структуре над входным сигналом.

На выходе структуры образ можно обрабатывать (распознавать) как единое целое или провести его дискретизацию по любому признаку для дальнейшего ввода последовательно или параллельно в последующий дискретный вычислитель, в котором проводится другая операция, описываемая оператором B , и т.д. Преобразование в электрические сигналы проводится матрицей фотоприемников, сформированной непосредственно на выходе структуры. Ток фотоприемных элементов анализируется логическими схемами поочередно. При этом в зависимости от программы анализа и характера вывода информации (последовательной или параллельной) количество логических шагов составляет значительную величину, равную 10^3 - 10^4 шагов при последовательном анализе в ЭВМ одной страницы.

Описываемый способ функциональной обработки позволяет существенно сократить число логических шагов и максимально использовать преимущества параллельной обработки информации, поскольку операции проводятся одновременно над большим набором чисел, характеризующих первичные признаки входного пространственного светового потока.

Заметим, что рассматриваемый способ аналогичен способу оптической пространственной фильтрации однако осуществляется в отличие от него в реальном масштабе времени. Время преобразования сигналов сокращается за счет запрограммированных в структуре оптических и электронных связей и высокой скорости их реализации, которая в классических структурах на основе арсенида галлия составляет 10^{-9} с., а в квантовых структурах - 10^{-12} с

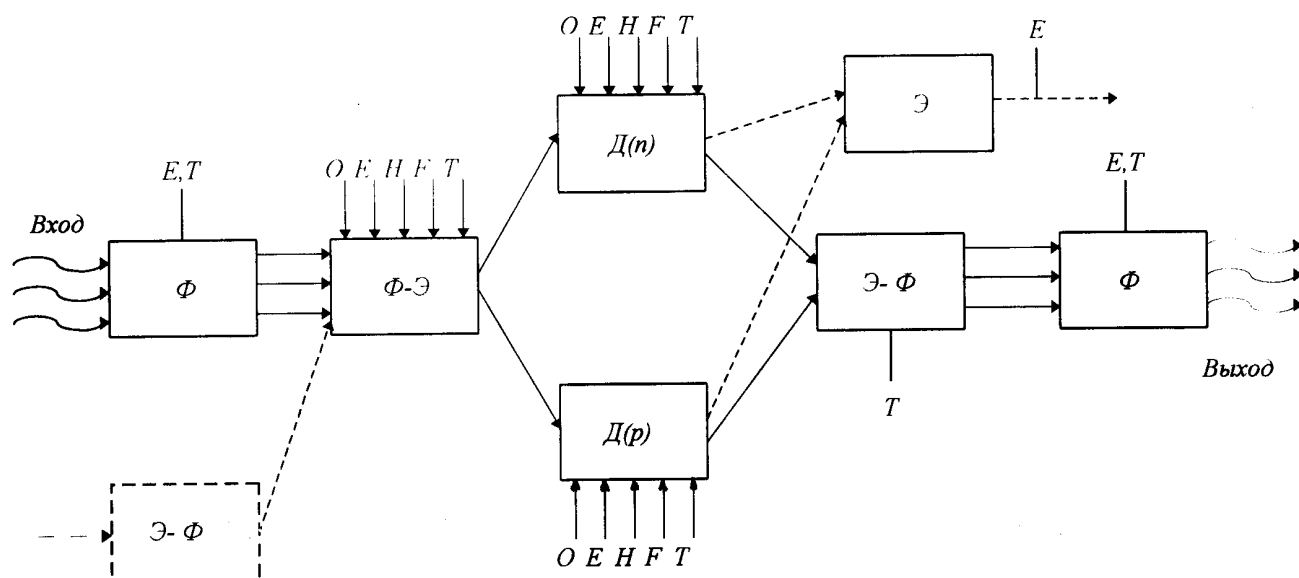


Рис. 2. Структурная схема квантового нанопроцессора; Φ — звено оптической фильтрации фотонов; $\mathcal{E}$ — звено электрического тока; $\Phi\text{-}\mathcal{E}$ — звено фотон-электронного преобразования. Стрелками показан ввод алгоритмов функциональных преобразований воздействием световым O , электрическим E , магнитным H , акустическим F и температурным T полями.

Процесс обработки информации в таком нанопроцессоре удобно проследить по структурной схеме рис. 2. Как и в случае последовательной обработки, для анализа параллельной обработки информации структура разбивается на ряд звеньев, в каждом из которых происходит физическое взаимодействие ансамбля носителей информации - электронов и фотонов - со специально выращенными неоднородностями состава твердого раствора. Кроме такого запрограммированного изменения свойств среды, в различных звеньях возможно воздействие на характеристики сигналов внешних факторов, посредством которых можно влиять на входную функцию различными операторами преобразования, хранящимися в отдельных элементах памяти, построенных на массиве квантовых ям или точек. Сопряжение квантовых нанопроцессоров с памятью для хранения операторов позволяет реализовать функциональные оптоэлектронные вычислители, которые по производительности и технологичности существенно превосходят транзисторные микропроцессоры.

В более общем случае множества оптических сигналов, каждый из которых характеризуется своей длиной волны, на вход многослойной структуры подаются световые поля, которые с учетом коэффициентов отражения $R(x, y, \lambda)$ описываются комплексными функциями вида

$$\sum \Phi(x, y, \lambda) = \sum_{\lambda=1}^{\lambda=\alpha} \Phi_0(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] [1 - R(x, y, \lambda)],$$

где $\alpha_n = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / \Delta\lambda$ - количество спектральных каналов, которые могут разместиться в диапазоне длин волн, поглощаемых слоями с переменной E_g .

Входной слой представляет собой пространственный оптический фильтр. Если модуляционная характеристика фильтра выражается как $T(x,y)$, то после прохождения фильтра спектр сигнала для одной длины волны принимает вид

$$\Phi_1(x,y) = \Phi(x,y) T(x,y)$$

Выращивая эпитаксиальную пленку с соответствующим распределением оптических констант, например показателя преломления, можно синтезировать такую переходную оптическую характеристику входного слоя, чтобы в нем осуществлялось требуемое преобразование оптического сигнала.

Поскольку входное звено представляет собой пространственный оптический фильтр, в нем возможно как прямое преобразование Фурье

$$F(\Phi) = \Phi(f_x^\lambda, f_y^\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x,y) \exp[-i2\pi(f_x^\lambda x + f_y^\lambda y)] dx dy,$$

так и обратное преобразование Фурье:

$$F^{-1}(\Phi) = \Phi(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(f_x^\lambda, f_y^\lambda) \exp[-i2\pi(f_x^\lambda x + f_y^\lambda y)] df_x^\lambda df_y^\lambda,$$

где f_x^λ и f_y^λ - пространственные частоты для всех длин волн входного сигнала.

Заметим, что в частном случае некогерентного оптического сигнала информация заложена в интенсивности световой волны на глубине z и в единицу времени генерируется $g(x,y,z)dz$ электронно дырочных пар. Функция генерации $g(x,y,z)$ для полупроводника с постоянной E_g выражается экспонентой, а для полупроводника с линейным градиентом E_g - колоколообразной зависимостью. Синтезируя функции генерации, можно осуществить заданные преобразования сигналов. Различные функции генерации реализуются программным изменением состава полупроводникового твердого раствора и, следовательно, коэффициента поглощения. Поскольку функция генерации определяется коэффициентом поглощения, его величину можно изменять, как и в предыдущем звене электрическим и температурным полем. Кроме того в этом звене пространственное распределение генерированных электронно-дырочных пар легко изменять световым полем той же или другой, чем основной сигнал, длины волны, магнитным, электрическим или акустическим полями.

Генерированные электроны и дырки создают полный электрический заряд, плотность которого в соответствии с уравнением Пуассона равна

$$\rho(x,y,z) = \text{div } D,$$

где ε — диэлектрическая проницаемость материала; $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$ — индукция; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; E — напряженность электрического поля.

Электроны и дырки под действием внутреннего поля, обусловленного градиентом E_g , дрейфуют в узкозонную часть кристалла. На дрейф электронов и дырок раздельно можно воздействовать как заранее заданным законом распределения внутреннего тянущего поля, так и вводя соответствующие алгоритмы функциональных преобразований физическими воздействиями, удобными для технической реализации.

Особенность входного слоя с градиентом E_g состоит в том, что в нем возможна фильтрация по длине волны, т.е. функция пропускания зависит от λ $T(x,y)=T'(\lambda)$. Для немонахроматического входного сигнала

$$\Phi(x,y,\lambda) = [\Phi(x,y)]T'(\lambda).$$

В звене оптической пространственной фильтрации возможен ввод алгоритмов обработки внешним электрическим полем или изменением температуры. В принципе возможны и другие физические воздействия для ввода алгоритмов, однако воздействия оптических сигналов, магнитного и акустического полей изменяют характеристики пропускания полупроводников очень мало.

Приложение электрического поля к полупроводнику изменяет край фундаментального поглощения в $K/K_0 = 1 + \varphi(h\nu, E)$ раз, где $K_0 = A_2 (R\nu - E_g)^{1/2}$ — коэффициент поглощения прямого полупроводника без электрического поля; параметр A определяется через константы материала и слабо зависит от энергии фотонов; φ — функция, которая вычисляется через интегралы Эйри и является функцией энергии фотонов и электрического поля.

Наложение температурного поля изменяет край поглощения в бинарных соединениях пропорционально температурному изменению E_g , равному

$$E_g = E_g(0) - \alpha_k T^2 / (T + \theta),$$

где α_k — эмпирическая константа; θ — дебаевская температура при температуре абсолютного нуля.

Пройдя область дрейфа, носители поступают в звено формирования выходного сигнала. Передаточная характеристика двумерного оптического сигнала, адекватно преобразованного в электронный рельеф, определяется диффузионно-дрейфовым механизмом переноса. Ее можно оценить из соотношения

$$H(f_x) = \left(1 - \frac{\exp(\alpha d)}{1 + \alpha L}\right) / \left(1 - \frac{\exp(-\alpha d)}{1 + \alpha L}\right),$$

где $\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + (2\pi f_x)^2$; $L_0 = L_{ad}$ — диффузионно-дрейфовая длина неосновных носителей; d — толщина области дрейфа; α — усредненный коэффициент поглощения.

Для шага $p=10$ мкм, $f_{s \max} = 1/2p = 50 \text{ мм}^{-1}$, $L_0=10$ мкм и $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$ получаем $H(f_{s \max}) = 0,65$.

В электронном звене передачи целесообразно провести сжатие сигнала до размеров, определяемых разрешающей способностью электронных систем, порядка длины волны электронов в кристалле полупроводника которая составляет примерно 0,1 нм. Процесс обработки сигналов будет происходить в наноструктурах электронного звена, на 3-4 порядка уменьшенных по сравнению со структурами микропроцессоров на транзисторных вентилях и на 6-8 порядков уменьшенных по сравнению с классическими оптическими процессорами, использующими дискретные лазеры и оптические линзы, о которых речь шла вначале.

Если в квантовом нанопроцессоре выходным является оптический сигнал, в выходном слое необходимо обеспечить пространственную декомпрессию и эффективную излучательную рекомбинацию. Если же выходными являются электрические сигналы, они формируются в цепях внешних источников тока, в которые включаются области формирования выходных сигналов. Получение необходимой амплитуды сигналов достигается их усилением в матрице нанотранзисторов или в усилителях света.

Выходной сигнал представляет собой результат функциональной обработки при прохождении сигнала через систему с передаточной функцией

$$H(f_x, f_y) = [H_1(f_x, f_y) H_2(f_x, f_y)] H_3(f_x, f_y).$$

Для наглядности покажем, как с помощью функциональных квантовых процессоров на полупроводниках с градиентом ширины запрещенной зоны можно выполнять некоторые математические операции.

1. Сложение сигналов $\Phi_1(x, y, \lambda)$ и $\Phi_2(x, y, \lambda)$ производится подачей на структуру (рис. 1д) обоих сигналов за время, намного меньшее времени дрейфа носителей к области регистрации.

2. Перемножение двух сигналов осуществляется в структуре, в которой один сигнал создает дрейф электронов, а другой дрейф дырок. Тогда на выходе получим сигнал пропорциональный произведению их концентраций. Подавая этот сигнал на вход I, а третий сигнал на вход II, можем последовательно получить результат умножения трех сигналов и т.п. Коэффициент пропускания тракта прохождения оптического сигнала необходимо изменять другими сигналами по закону, определяемому перемножаемыми функциями. Для этого удобно воспользоваться эффектом Франца-Келдыша с пропорциональным управлением светом.

3. Дифференцирование одномерного сигнала $\Phi(x, y)$ можно произвести, используя соотношение (для одномерного случая):

$$\Phi' = \int f'(x) \exp(-i2\pi f_x) dx = -i2\pi f_x S(f_x).$$

Из приведенной формулы следует, что надо сформировать Фурье-образ входного S входного сигнала и затем умножить его на f_x . Умножение можно осуществить описанным выше способом.

4. Интегрирование сигнала осуществляется при его фотон-электронном преобразовании в заданных пределах:

$$I(t) = a \int_{l_x} \int_{l_y} \Phi(x, y) Q(x, y, t) dx dy.$$

где t — время интегрирования; l_x и l_y — контуры входного светового поля; a_n — постоянная.

Пределы интегрирования определяются зоной обработки сигналов, которая может оставаться постоянной или изменяться. Если зона обработки изменяется во времени в процессе обработки, то можно получить развертку процесса обработки во времени, если скорость записи сигнала больше скорости изменения зоны обработки.

5. Распознавание образов сводится к выделению из содержащего полезный и посторонний сигнал входного сигнала лишь полезной его части. Для этого распознаваемый образ подается на вход I структуры рис. 1 д, а образ сравнения — на вход II. При совпадении образов селективный детектор на выходе регистрирует большой световой сигнал, тогда как при отсутствии распознаваемого образа величина сигнала будет малой.

Приведенные примеры лишь демонстрируют достоинства функциональной обработки информации в квантовых нанопроцессорах с переменной запрещенной зоной и не раскрывают всего многообразия возможных их применений.

Предложенный выше принцип формирования пригоден как для некогерентных оптических сигналов, так и для когерентных. Во втором случае во входной плоскости структуры может быть сформирована интерференционная картина обрабатываемого изображения, которая существует в виде рельефа ансамбля электронов и дырок и под действием внутреннего тянущего поля перемещается к узкозонной части полупроводника, где преобразуется в оптический или электрический сигнал.

Известно, что интерференционные решетки на свободных носителях в кремнии не привели к практическому применению полупроводников в качестве регистрирующих сред из-за малого времени существования изображения по сравнению с временем регистрации. Совмещение оптической регистрирующей среды, квантоворазмерных электронных наноструктур и пикосекундных приемников в одном монокристалле квантового нанопроцессора с переменной запрещенной зоной открывает широкие возможности для голографической обработки информации в реальном масштабе времени.

Заключение.

Как следует из проведенного анализа для создания тянущего поля для электронов $E = q \cdot 1E_g / dx$ нужно создавать градиент края зоны проводимости, тогда как для создания тянущего поля для дырок необходим градиент края валентной зоны. Технологически это может быть достигнуто изменением содержания в твердом растворе атомов третьей (пятой) групп в тройных твердых растворах или четырех сортов атомов в четверных системах типа InGaAsP, выращиваемых в процессах газофазной или молекулярно-лучевой

эпитаксии. Эпитаксиальная технология должна обеспечивать широкий диапазон толщин, от сотни микрон до единиц нанометров. Это требует довольно сложного сочетания различных эпитаксиальных технологий и компьютерного управления процессами роста. Однако оценки показывают, что экономически это целесообразнее создания сверхбольших интегральных схем на транзисторных вентилях с нанометровыми размерами элементов. Более того, функциональные квантовые нанопроцессоры позволяют снять физические и технико-экономические ограничения микропроцессоров на транзисторных вентилях которые возникают при необходимости обработки сверхбольших информационных потоков в реальном масштабе времени.

1. К.Престон. Когерентные оптические вычислительные машины. М., Мир, 1974, 399 с.
2. H.J.Caulfield. Optical computing benefits from quantum mechanics, Laser focus world, May 1995, p.181-184..
3. Ж.И. Алферов. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. ФТП.т 32, вып. 1,3-18,1998.
4. В.И.Осинский. Гетероэлектроника, как физико-технологическая основа сверхскоростных систем информационного общества, -Материалы 7-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»,-Севастополь, 1997, т1, с.317-319
5. В.И.Осинский, В.В.Луговский, Ю.Е.Николаенко. Микролазерные технологии - стратегия радиоэлектроники и информационной техники Украины. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, N4, 12-16,1997.
6. В.И.Осинский, В.И.Привалов, О.Я.Тихоненко. Оптоэлектронные структуры на многокомпонентных полупроводниках. Мн., Наука и техника, 1981, 2 с.
7. А.с. 181737 (СССР). Полупроводниковый лазер с электрической накачкой. Ж.И. Алферов, Р.Ф.Казаринов - Оpubл. в БИ,1975, N14.
8. Сирота Н.Н., Осинский В.И. Излучение p-n переходов на кристаллах твердых растворов фосфида индия-арсенида галлия.- Докл. АН СССР, Сер. физ., 1966, т. 171., N2 , с. 317-319.
9. V. Osinsky. Optoelectronic properties of heterogeneous semiconductors at superhigh time and space frequencies. Proceedings 5-th International Symposium on recent advances in microwave technology, Kiev , Kiev, Sept 11-16, 1995, part 2., pp.433-436.
- 10.P.W.Milonni, J.H.Eberly, Laser, Wiley, N.Y., 1988.
- 11.E.Yablonovitch, "Photonic bandgap structures", J.Opt.Soc. Am. B10; 283 (1993).
- 12.E.Yablonovich. Inhibited Spontaneous Emission in Solid State Physics and Electronics, Phys. Rev. Lett. 58: 2059 (1987).
- 13.Jean-Michael Gerard. Prospects of high-efficiency quantum boxes obtained by direct epitaxial growth. "Confined Electrons and Photons", Edited by E.Burstein and C.Weisbuch. NATO ASI Series, Series B: Physics, Vol. 340, Plenum Press, N.Y., 1995, p.357-381.
- 14.Y.Qiu, A.Osinsky, A.A.El-Emany, E.Littlefield, H.Temkin, N.Faleev. Growth modes of ZnSe on GaAs. J.Appl.Phys., 79 (2), 1996, 164.
- 15.S.A.Gurevich,O.A.Lavrova,N.V.Lomasov,S.I.Nesterov,V.I.Scopina,E.M.Tanklevskaya,V.V.Travnikov,A.Osinsky,Y.Qin,H.Temkin,M.Rabe,E. Henneberger.
- 16.ZnCdSe/ZnSe quantum well wires fabricated by reactive ion etching and wet chemical treatment. Semicond. Sci. Technol.13,1998,pp. 139-141
- 17.H.Van Houten, C.W.J.Beenakker. Principles of Solid State electron optics. Confined Electrons and Photons, Edited by E.Burstein and C.Weisbuch. NATO ASI Series, Series B: Physics, Vol. 340, Plenum Press, N.Y., 1995, p.269-303.
- 18.W.Van Haeringen, D.Lenstra "Analogies in Optics and Microelectronics", Kluwer, Dordrecht (1990), Physica B175 (1990).
- 19.R.Landauer, Conductance from transmission: Common Sense points, Physica Scripta T42: 110 (1992); M.Buttiker. Symmetry of electrical conduction, IBM J. Res. Dev. 32: 317 (1988).
- 20.E.A.Montie, E.C.Cosman, G.W.St Hooft, M.B.Van der Markt and C.W.J.Beenakker, Observations of the optical analogue of cuaantired conductance of a point contact, Nature 350: 594 (1991).

21. В.П. Деркач, Г.Ф. Кияшко, М.С. Кухарчук. Электронно-зондовые устройства. К. Наукова думка, 1974 - 267 с.
22. С.В. Свечников. Элементы оптоэлектроники, М., Сов. радио, 1971, 272 с.
23. В.И. Осинский, Н. Костюкович. Интегральный оптрон. а.с. N 551730 (СССР), Приоритет 1973 г.
24. П.Ф. Олексенко, С.В. Свечников, Элементарные оптроны. Полупроводниковые приборы и их применение. М., Сов. радио, вып. 25, 1971, 272 с.
25. В.И. Осинский. Журнал прикладной спектроскопии, 21, 5, 849, 1974.
26. В.И. Осинский. Интегральная оптоэлектроника. Мн., Наука и техника, 1977, 248 с.