

07:09

Инжекционный лазер с функционально интегрированным частотным модулятором на основе пространственно смещенных квантовых ям

© Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, М.А. Денисенко

Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
E-mail: earyndin@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2013 г.

Предложен метод построения инжекционных лазеров с функционально интегрированными частотными модуляторами оптического излучения на основе пространственно смещенных квантовых ям в зоне проводимости и валентной зоне. Рассмотрены структура и варианты зонных диаграмм функционально интегрированных лазеров-модуляторов. Показано, что максимальные частоты модуляции в предложенных наногетероструктурах определяются временем управляемой передислокации максимумов плотности носителей заряда в квантовых областях и соответствуют терагерцовому диапазону.

Одной из проблем увеличения степени интеграции современных ультрабольших интегральных схем (УБИС) и, в частности, увеличения числа ядер на кристаллах является недостаточно высокая эффективность применяющихся металлических межъядерных соединений, перестающих удовлетворять растущим требованиям по быстродействию, энергоэффективности и помехозащищенности. Специалисты ведущих фирм видят решение данной задачи прежде всего в использовании интегральных систем оптической коммутации, одной из основных проблем создания которых является реализация быстродействующих источников и модуляторов оптического излучения и их интеграция на кристалле с использованием традиционных полупроводниковых технологий [1,2].

В современных интегральных системах оптической коммутации широко применяется амплитудная модуляция: внешняя — с использованием модуляторов, или внутренняя — посредством управления плотностью тока накачки лазера [3]. Динамика модуляции посредством управления плотностью тока накачки определяется переходными процессами

в цепи питания лазера, что ограничивает максимальную частоту модуляции. Внешние модуляторы также не всегда удовлетворяют требованиям по быстродействию и, как правило, реализуются на основе материалов, не позволяющих изготавливать их в едином технологическом цикле с интегральными полупроводниковыми структурами [4].

В работах [5,6] как один из возможных подходов к решению данной проблемы предложена концепция построения УБИС, объединяющая ядра, выполненные на основе кремниевых технологий, и систему оптической коммутации на основе материалов группы $A^{III}B^V$, причем реализация такой системы возможна в едином технологическом цикле. В качестве основного элемента таких коммутирующих оптических систем предлагается использовать функционально интегрированную наноструктуру, объединяющую в себе источник и модулятор оптического излучения, в которой амплитудная модуляция осуществляется за счет управляемой пространственной передислокации максимумов плотности носителей заряда в квантовых областях зоны проводимости и валентной зоны, сконфигурированных определенным образом [6,7]. По результатам моделирования, представленным в [4,6], частота модуляции в таких лазерах-модуляторах может достигать терагерц.

Дальнейшее расширение функциональных возможностей интегральных систем оптической коммутации возможно за счет использования не только амплитудной, но и частотной модуляции лазерного излучения. Так, например, в качестве основы элементов молекулярной электроники широкое распространение получили органические материалы с бистабильными фотохромными молекулами, изменяющими свои свойства под воздействием фотонов с определенной длиной волны. Синтез новых фотохромных органических материалов открывает перспективы создания интегральных устройств молекулярной электроники с уникальными характеристиками, недостижимыми в рамках современной парадигмы кремниевой электроники [8]. Однако создание подобных устройств невозможно без согласования основных параметров бистабильных органических молекул с характеристиками модулируемых по частоте интегральных источников лазерного излучения, управляющих состоянием данных молекул или молекулярных ансамблей. Прежде всего, это относится к максимальной частоте модуляции лазерного луча.

Целью данной работы является разработка метода построения оптоэлектронных приборов нового класса, „лазерных триодов“ — инжекционных лазеров с частотными модуляторами, функционально

интегрированными в единой наногетероструктуре, обеспечивающих частотную модуляцию стимулированного излучения в терагерцовом диапазоне.

С учетом использования в цифровых интегральных схемах двухуровневой логики целесообразно обеспечить спектр модулированного оптического сигнала, содержащий два максимума, т.е. обеспечить управляемое изменение длины волны лазерного излучения между определенными значениями λ_1 и λ_2 , одно из которых соответствует логическому нулю, а второе — логической единице.

Предлагаемый метод построения быстродействующих инжекционных лазеров с функционально интегрированными частотными модуляторами состоит в следующем:

— инжекционный лазер-модулятор представляет собой полупроводниковую наноструктуру, в которой функционально интегрированы области вырожденного p - n -перехода с соответствующими омическими (питающими) контактами и гетероструктура частотного модулятора с дополнительными (управляющими) контактами в виде сконфигурированной определенным образом системы квантовых ям;

— в цепи питания лазера задается определенный ток накачки, обеспечивающий по истечении переходного процесса инверсную заселенность и неизменное во времени суммарное число электронов и дырок в квантовых ямах активной области;

— в наногетероструктуре частотного модулятора, функционально интегрированной в инжекционный лазер, квантовые ямы зоны проводимости пространственно смещены относительно квантовых ям валентной зоны таким образом, что при одном направлении управляющего поля наблюдается пространственное совмещение максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах, разделенных запрещенной зоной шириной E_{G1} , и генерация лазерного излучения с длиной волны λ_1 , а при противоположном направлении управляющего поля — пространственное совмещение максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах, разделенных запрещенной зоной шириной E_{G2} , и соответственно генерация лазерного излучения с длиной волны λ_2 ;

— при неизменном уровне инжекции электронов и дырок в активную область лазера суммарное число носителей заряда в квантовых ямах при изменении направления управляющего поля остается практически неизменным, в результате чего максимальная частота модуляции лазерного луча определяется не относительно инерционными процессами накопления и рассасывания носителей заряда в активной области

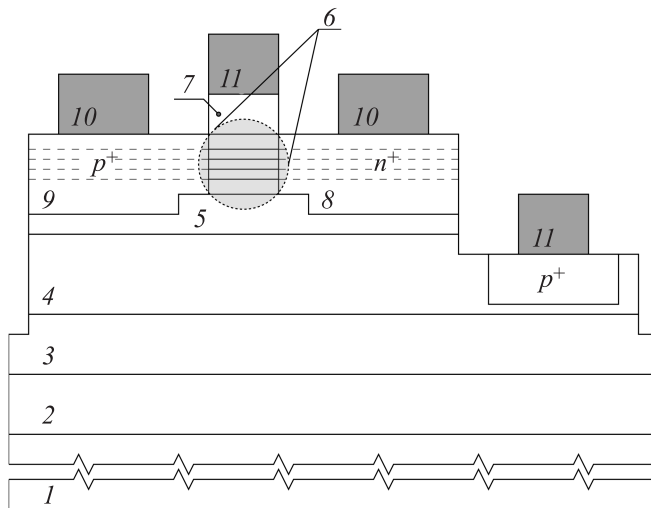


Рис. 1. Структура инжекционного лазера с функционально интегрированным частотным модулятором (1 — кремниевая подложка; 2 — буферный градиентный слой GaAsP [10]; 3 — полуизолирующий GaAs; 4 — p-GaAs; 5 — n-GaAs; 6 — наногетероструктура частотного модулятора; 7 — n-GaAs; 8 — инжектирующая n^+ -область; 9 — инжектирующая p^+ -область; 10 — контакты питания; 11 — управляющие контакты).

лазера, а временем управляемой полем передислокации максимумов плотности электронов и дырок в квантовых областях зоны проводимости и валентной зоны, которое, согласно результатам численного моделирования, приведенным в [4,9], составляет $(2.0-0.8) \cdot 10^{-13}$ с в зависимости от параметров квантовых ям, что соответствует частотам терагерцового диапазона;

— с учетом того, что спектр оптического излучения функционально интегрированного лазера-модулятора содержит максимумы излучения на длинах волн λ_1 и λ_2 , длина резонатора лазера должна быть кратной одновременно $\lambda_1/2$ и $\lambda_2/2$.

На основе предложенного метода построения разработана структура быстродействующего инжекционного лазера с функционально интегрированным частотным модулятором излучения, представленная на рис. 1.

Одной из основных проблем технологической реализации данной структуры является выращивание монокристаллических слоев GaAs на кремниевой подложке. В настоящее время разработан ряд технологий, позволяющих решить данную проблему. В представленной на рис. 1 структуре для этой цели предполагается использовать буферный градиентный слой GaAsP (поз. 2 на рис. 1). В соответствии с данными, приведенными в работе [10], фосфид галлия (GaP) и кремний (Si) имеют достаточно близкие параметры кристаллических решеток (несоответствие 0.37%), что позволяет сформировать слой с плавным увеличением процентного содержания As в твердом растворе GaAsP и при определенной толщине данного буферного слоя обеспечить переход к монокристаллическому GaAs.

В отличие от традиционных лазерных диодов, имеющих вертикальную структуру, в предложенном лазере-модуляторе высоколегированные инжектирующие области с электронной и дырочной проводимостью (поз. 8, 9 на рис. 1) имеют горизонтальное взаимное расположение и при этом разделены вертикальной наногетероструктурой функционально интегрированного частотного модулятора (поз. 6 на рис. 1). В процессе технологической реализации лазера-модулятора данная особенность структуры может привести к уменьшению градиентов концентраций легирующих примесей на границах активной области модулятора и высоколегированных n^+ - и p^+ -областей, что необходимо учитывать в процессе проектирования. Принимая во внимание, что благодаря неизменному уровню тока накачки суммарное число носителей в активной области лазера остается неизменным и практически не зависит от направления поперечного управляющего поля, максимальная частота модуляции ограничивается в данном случае в основном инерционностью управляемой передислокации носителей в пределах квантовых областей модулятора. При этом частотный модулятор представляет с собственно инжекционным лазером функционально интегрированную наногетероструктуру и может быть изготовлен в едином процессе с использованием традиционных технологических операций.

В соответствии с предложенным методом построения функционально интегрированных лазеров-модуляторов разработаны основные варианты наногетероструктур частотных модуляторов (поз. 6 на рис. 1), зонные диаграммы которых и соответствующие распределения концентраций электронов $n(x)$ и дырок $p(x)$ при противоположных направлениях управляющего электрического поля и неизменном уровне тока накачки схематически представлены на рис. 2.

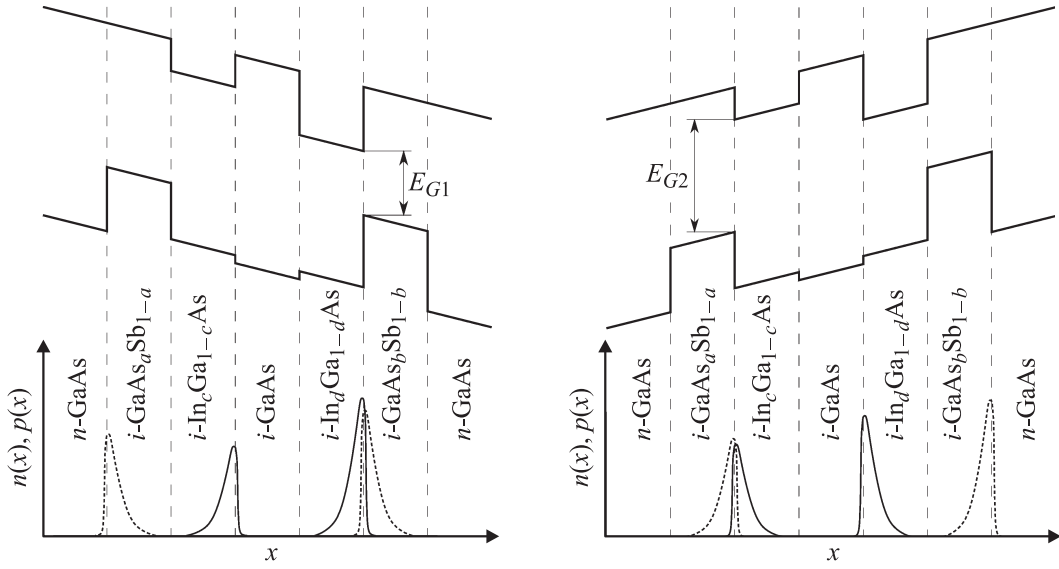


Рис. 2. Зонные диаграммы первого (а) и второго (б) вариантов наноструктуры частотного модулятора и соответствующие распределения концентраций электронов (сплошные линии) и дырок (пунктирные линии) при противоположных направлениях управляющего поля.

В соответствии с зонными диаграммами изменение направления поперечного управляющего поля приводит к передислокации максимумов плотности электронов и дырок к противоположным гетерограницам квантовых ям. Пространственное смещение квантовых ям зоны проводимости относительно квантовых ям валентной зоны обеспечивает пространственное совмещение максимумов плотности электронов и дырок в областях, разделенных зонами запрещенных энергий шириной либо E_{G1} , либо E_{G2} , в зависимости от направления управляющего поля при неизменном токе накачки. В результате генерируется оптическое излучение с длиной волны λ_1 или λ_2 соответственно, т.е. осуществляется частотная модуляция лазерного луча в процессе его формирования.

Поскольку ток накачки в процессе модуляции остается неизменным, максимальная частота модуляции не ограничена относительно инерционными переходными процессами в цепи питания лазера, а определяется временем управляемой передислокации максимумов плотности электронов и дырок в пространственно смещенных квантовых областях, позволяющим, согласно результатам численного моделирования, приведенным в [4], достигать терагерцевых частот модуляции.

Вариант наноструктуры модулятора, представленный на рис. 2, *a*, имеет по две пространственно смещенные квантовые ямы в зоне проводимости и в валентной зоне. В варианте, приведенном на рис. 2, *b* смежные квантовые ямы зоны проводимости объединены в одну квантовую область. Пространственное смещение квантовых ям в приведенных вариантах наноструктур частотных модуляторов достигается за счет использования гетеропереходов второго типа на основе полупроводниковых твердых растворов $\text{In}_a\text{Ga}_{1-a}\text{As}$, $\text{GaSb}_b\text{As}_{1-b}$. Различная ширина областей запрещенных энергий на границах гетеропереходов второго типа, обеспечивающая частотную модуляцию лазерного луча в процессе его формирования, достигается в результате подбора компонентного состава полупроводниковых твердых растворов (констант a , b).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-07-00274), Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты 7.5760.2011, 8.5757.2011), а также за счет средств Программы развития Южного федерального университета (2011–2021 гг.).

Список литературы

- [1] *Chau R.* // *Physica E.* 2003. V. 19. N 1–2. P. 1.
- [2] *Буяло М.С., Горбачевич А.А., Егоров А.Ю., Гаджиев И.М., Бахшаев И.О., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Портной Е.Л.* // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38. В. 7. С. 31–39.
- [3] *Vlasov Y., Green W.M.J., Xia F.* // *Nature Photonics.* 2008. N 2. P. 242–246.
- [4] *Konoplev B.G., Ryndin E.A.* // *Semiconductors.* 2008. V. 42. N 13. P. 1462–1468.
- [5] *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* // *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2011. N 4 (117). С. 21–27.
- [6] *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* // *Вестник Южного научного центра РАН.* 2010. Т. 6. № 3. С. 5–11.
- [7] *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Интегральный инжекционный лазер с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда: Патент на изобретение № 2400000, приоритет от 11.03.2009.
- [8] *Минкин В.И.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2008. № 4. С. 673–703.
- [9] *Gorbatshevich A.A., Karaev V.V., Koraeв Yu.V., Kremlev V.Ya.* // *Phys. Low-Dim. Struct.* 1994. № 4/5. P. 57–62.
- [10] *Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П.* // *УФН.* 2008. Т. 178. № 5. С. 459–480.