

Многоволновый интегральный оптический модулятор лазерного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур

© С.О. Слипченко[¶], А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, В.В. Золотарев, И.С. Шашкин, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, М.Г. Растегаева, И.С. Тарасов, П.С. Копьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 21 октября 2013 г. Принята к печати 1 ноября 2013 г.)

Предложена конструкция интегрального оптического модулятора лазерного излучения, использующая малосигнальное управление и обеспечивающая работу на нескольких длинах волн. Показано, что применение селективных зеркал позволяет создать интегрированные резонаторы, обеспечивающие генерацию на заданных дискретных линиях, и секцию управления, обеспечивающую изменение внутренних оптических потерь. Установлены основные соотношения, связывающие условия переключения генерации между выбранными модами с параметрами конструкции модулятора. Для спектрального диапазона 1060–1085 нм разработаны и исследованы экспериментальные образцы многоволновых модуляторов, использующих в качестве одного из зеркал распределенное брэгговское зеркало. Показано, что управление прямым током малой амплитуды позволяет переключать лазерную генерацию между оптически интегрированными резонаторами Фабри–Перо со скоростью 5–20 нс.

1. Введение

Управление потоками лазерного излучения является важной задачей в области информационных систем [1], а также комплексов, использующих импульсное лазерное излучение [2]. Общепринятой методикой генерации лазерных импульсов является импульсная токовая накачка. В этом случае амплитуда генерируемого излучения задается амплитудой тока накачки, что ограничивает быстродействие при генерации мощных лазерных импульсов [3,4]. В фотонных интегральных схемах для генерации лазерных импульсов на нескольких линиях используются дискретные элементы, что усложняет конструкцию. В данной работе предложена конструкция модулятора лазерного излучения, позволяющая в оптической интегрированной схеме реализовать принципы малосигнального управления и импульсной генерации на нескольких длинах волн.

2. Основная часть

Принцип модуляции лазерного излучения, рассматриваемый в данной работе, основан на управляемом переключении лазерной генерации между двумя устойчивыми модовыми структурами оптически интегрированных резонаторов Фабри–Перо. Для реализации заявленного принципа была предложена конструкция кристалла модулятора, схематическое изображение которой приведено на рис. 1. Она включает следующие основные элементы: секцию усиления (GS); секцию управления (CS); отражатели R_1 и R_2 , формирующие первый резонатор Фабри–Перо (FP1) с длиной L_1 , отражатели R_1 и R_3 , формирующие второй резонатор Фабри–Перо (FP2) с длиной L_2 . Секция GS предназначена для накачки стационарным или квазистационарным током, определяющим

амплитуду выходного оптического сигнала. Выходное зеркало с коэффициентом отражения R_1 сформировано гранью в виде естественного скола с напыленным просветляющим покрытием. Зеркало с коэффициентом отражения R_2 сформировано периодическим рельефом показателя преломления вдоль оси резонатора, дающим эффект внутренней дифракционной решетки [5]. В этом случае максимальная добротность будет только для лазерного излучения, попадающего в узкий спектр отражения селективного зеркала R_2 , что дает узкий спектр генерации. Секция CS предназначена для управления оптическими потерями моды, распространяющейся в резонаторе FP2, при этом зеркало R_3 может быть так же, как R_2 , сформировано периодическим рельефом показателя преломления вдоль оси резонатора, дающим

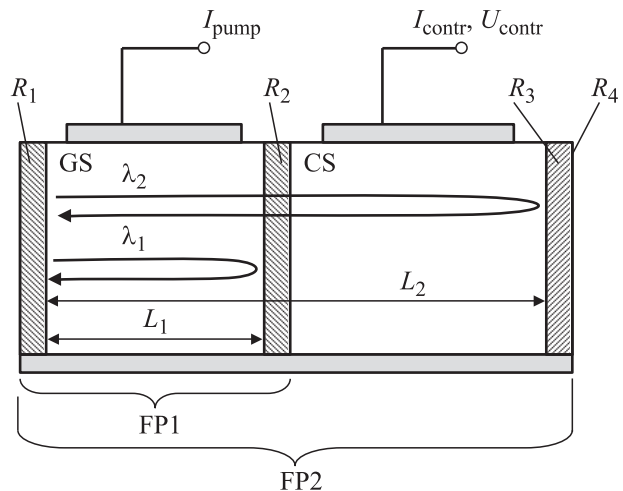


Рис. 1. Схематическое изображение сечения кристалла модулятора в плоскости, поперечной слоям гетероструктуры, в направлении вдоль оптического резонатора. I_{pump} — ток накачки, I_{contr} , U_{contr} — управляющие ток, напряжение.

[¶] E-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

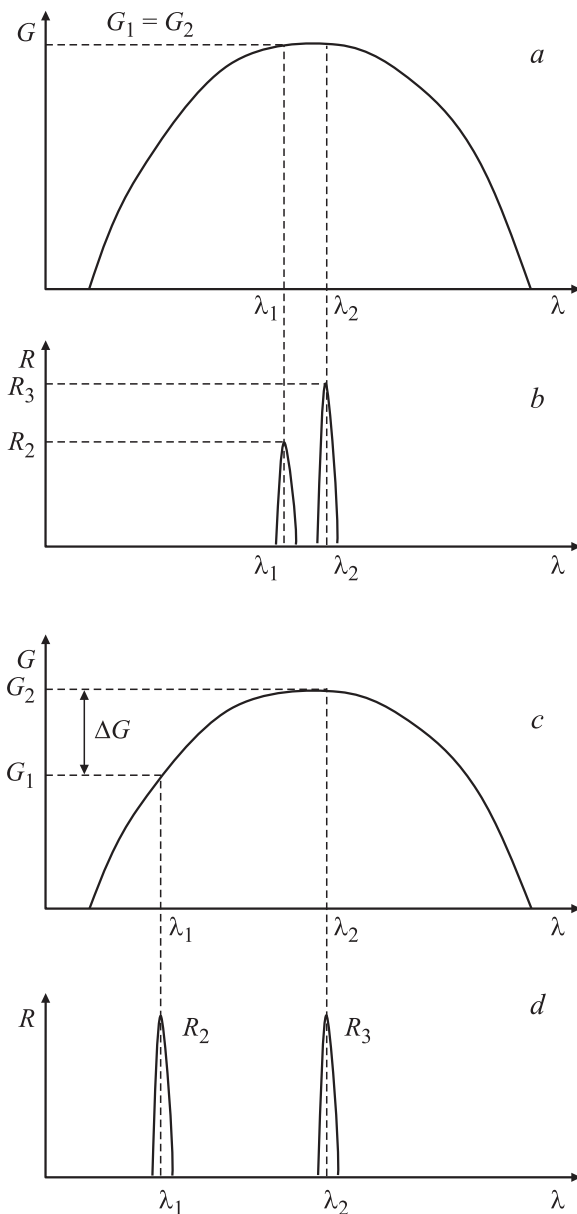


Рис. 2. Схематическое изображение спектральных зависимостей материального усиления в секции GS (a, c) и коэффициентов отражения R_2, R_3 (b, d) для исследуемой конструкции модулятора, реализуемых в случаях $\Delta G = 0$ (a, b), $\Delta G \neq 0$ (c, d).

эффект внутренней дифракционной решетки. При этом грань в виде естественного скола, ограничивающая зеркало R_3 , должна иметь просветляющее покрытие R_4 , подавляющее обратную связь от линий, не попадающих в спектр отражения R_3 . Так как спектры генерации резонаторов FP1 и FP2 задаются спектрами отражения R_2 и R_3 соответственно, то, управляя параметрами периодического рельефа (период, показатель преломления), можно независимо настраивать спектральный состав излучения резонаторов FP1 и FP2.

В рассмотренной конструкции могут существовать две устойчивые модовые конфигурации: для резонаторов

FP1 и FP2 с длинами волн λ_1 и λ_2 соответственно. Рассмотрим в рамках первого приближения случаи (рис. 2, a, b), когда разница между λ_1 и λ_2 достаточна, чтобы считать при заданной концентрации носителей заряда в активной области справедливыми равенства

$$R_2(\lambda_2) = 0, \tag{1}$$

$$R_3(\lambda_1) = 0, \tag{2}$$

$$G_1(\lambda_1) = G_2(\lambda_2), \tag{3}$$

где $G_1(\lambda_1), G_2(\lambda_2)$ — материальное усиление в активной области для λ_1 и λ_2 соответственно; $R_2(\lambda_2), R_3(\lambda_1)$ — коэффициенты отражения зеркал R_2 и R_3 на длинах волн λ_2 и λ_1 соответственно. Для обеспечения устойчивой одномодовой генерации необходимо, чтобы требуемое материальное усиление выбранной модовой структуры достигалось при минимальной концентрации носителей в активной области. В этом случае, используя малосигнальное управление потерями одной из модовых структур, можно переключать генерацию между модами. В предложенной конструкции кристалла модулятора могут существовать две устойчивые модовые структуры, соответствующие резонаторам Фабри–Перо FP1 и FP2 с пороговыми модальными усилениями g_{th1} и g_{th2} соответственно, описываемыми с помощью следующих равенств:

$$g_{th1} = G_{th}(\lambda_1)\Gamma_{FP1} = \frac{1}{2L_1} \ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right) + \alpha_i, \tag{4}$$

$$g_{th2} = G_{th}(\lambda_2)\Gamma_{FP2} = \frac{1}{2L_2} \ln\left(\frac{1}{R_1R_3}\right) + \alpha_i + \Delta\alpha \frac{L_2 - L_1}{L_2}. \tag{5}$$

Здесь $G_{th}(\lambda_1), G_{th}(\lambda_2)$ — пороговые материальные усиления для мод резонаторов FP1 и FP2 соответственно, $\Delta\alpha$ — избыточные оптические потери в секции CS, а отношение $(L_2 - L_1)/L_2$ определяет долю моды резонатора FP2, приходящуюся на секцию CS, α_i — внутренние оптические потери, Γ_{FP1} и Γ_{FP2} — факторы оптического ограничения в области усиления для резонаторов FP1 и FP2 соответственно, которые могут быть записаны следующим образом:

$$\Gamma_{FP1} = \Gamma_{QW}, \tag{6}$$

$$\Gamma_{FP2} = \Gamma_{QW} \frac{L_1}{L_2}, \tag{7}$$

где Γ_{QW} — фактор оптического ограничения квантовой ямы в плоскости, перпендикулярной слоям гетероструктуры. Тогда условие устойчивой генерации только одной моды реализуется, когда материальное усиление для нее минимально, и может быть записано для моды резонатора FP1 как

$$\frac{G_{th}(\lambda_1)}{G_{th}(\lambda_2)} < 1, \tag{8}$$

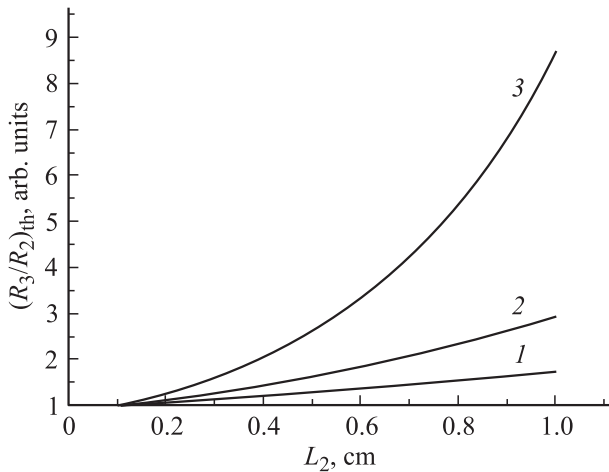


Рис. 3. Зависимости порогового отношения коэффициентов отражения $(R_3/R_2)_{th}$ от длины резонатора L_2 для различных значений внутренних оптических потерь α_i , cm^{-1} : 1 — 0.3, 2 — 0.6, 3 — 1.2. $\Delta\alpha = 0$, $L_1 = 0.1$ см.

для моды резонатора FP2 как

$$\frac{G_{th}(\lambda_1)}{G_{th}(\lambda_2)} > 1. \tag{9}$$

Выполнение пороговых условий генерации моды резонатора FP2 при спектральном положении линий λ_1 и λ_2 , удовлетворяющем равенству (3), требует выполнения следующего неравенства:

$$\Delta\alpha < \frac{1}{2(L_2 - L_1)} \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) - \alpha_i. \tag{10}$$

Несложно заметить, что при $R_4 = R_3$ пороговые условия не зависят от размеров секции CS. В этом случае устойчивая генерация только моды резонатора FP2 достигается, когда в секции CS создано усиление, компенсирующее внутренние оптические потери α_i . Переключение в режим устойчивой генерации только моды резонатора FP2 в условиях сохранения остаточных внутренних потерь секции CS возможно, когда отношение коэффициентов отражения R_2 и R_3 удовлетворяет неравенству

$$\frac{R_3}{R_2} > \exp[2\alpha_i(L_2 - L_1)]. \tag{11}$$

Превышение реальных величин R_3/R_2 над пороговыми значениями $(R_3/R_2)_{th}$, зависимость которых от параметров модулятора показана на рис. 3, задает скорость переходного процесса переключения генерации между модовыми структурами. Однако необходимо отметить, что условия (10) и (11) определяют верхний предел и порог генерации моды FP2 может выполняться для меньших значений отношения $(R_3/R_2)_{th}$, если в секции CS будет получено положительное усиление.

Разнесение спектров отражения зеркал R_2 и R_3 на большее расстояние (такое, что равенство (3) перестает

выполняться) не вносит изменений в физические принципы модовых переключений, но позволяет существенно упростить условия подбора управляющих сигналов. Так, смещение линии генерации λ_1 относительно λ_2 в коротковолновую сторону обеспечивает условие, когда при сопоставимых пороговых концентрациях будет выполняться следующее неравенство для материальных усилений при заданной концентрации носителей в активной области (рис. 2, c, d):

$$G_1(\lambda_1) < G_2(\lambda_2), \tag{12}$$

а выражение (5) переписывается как

$$g_{th2} = [G_{th}(\lambda_2) + \Delta G]\Gamma_{FP2} = \frac{1}{2L_2} \ln\left(\frac{1}{R_1R_3}\right) + \alpha_i + \Delta\alpha \frac{L_2 - L_1}{L_2}, \tag{13}$$

где ΔG определяет разницу материальных усилений между длинами волн λ_1 и λ_2 (рис. 2, c, d). Тогда пороговые условия генерации моды резонатора FP2 должны выполняться при удовлетворении следующего неравенства для порогового модального усиления $\Delta g_{th} = \Gamma_{QW}\Delta G$:

$$\Delta g_{th} > \frac{1}{2L_1} \ln\left(\frac{R_2}{R_3}\right) + (\alpha_i + \Delta\alpha)\left(\frac{L_2}{L_1} - 1\right). \tag{14}$$

Видно, что разнесение линий генераций λ_1 и λ_2 может существенно расширить диапазон параметров конструкции модулятора, при которых выполняются пороговые условия генерации в резонаторе FP2 (рис. 4). Видно, что требуемое превышение материального усиления для выполнения пороговых условий генерации моды резонатора FP2 не имеет прямой связи с потерями на выход. Так, для моды резонатора FP2 порог включения

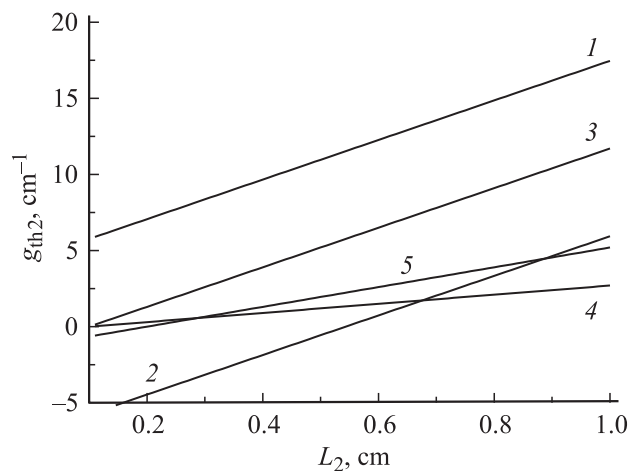


Рис. 4. Зависимости g_{th2} , определяющего границу выполнения пороговых условий генерации моды резонатора FP2, от его длины L_2 для различных значений параметров конструкции модулятора α_i , cm^{-1} / L_1 , см / R_3 , отн.ед. / R_2 , отн.ед. / $\Delta\alpha$, cm^{-1} : 1 — 0.3/0.1/0.3/0.95/1; 2 — 0.3/0.1/0.95/0.3/1; 3 — 0.3/0.1/0.95/0.95/1; 4 — 0.3/0.2/0.95/0.95/1; 5 — 0.3/0.1/0.95/0.95/0.

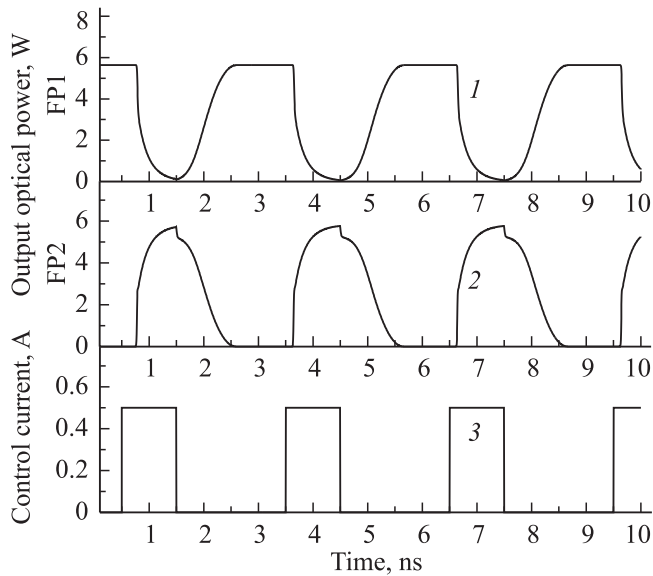


Рис. 5. Динамика выходной оптической мощности мод резонаторов FP1 (1) и FP2 (2) при импульсном малосигнальном управлении прямым током (3). Параметры модулятора, использованные для расчета: $\Delta G = 0$, $L_1 = 0.1$ см, $L_2 = 0.2$ см, $R_2 = R_3 = 0.95$, $R_1 = 0.05$, $\alpha_i = 0.3$ см⁻¹, $\Delta\alpha = 0.3$ см⁻¹, $I_{\text{pump}} = 5$ А, $\lambda_1 = 1.07$ мкм, $\lambda_2 = 1.065$ мкм.

повышается с падением коэффициента отражения зеркала R_3 и понижается с уменьшением длины резонатора L_2 . Также можно отметить, что при определенной комбинации параметров появляется область, в которой выполняются пороговые условия для моды резонатора FP2, когда смещение линий генерации ведет к уменьшению материального усиления для моды резонатора FP2 (отрицательная область на рис. 4).

Выбор параметров конструкции модулятора (внутренние оптические потери, коэффициенты отражения R_2 и R_3 , длины резонаторов L_1 и L_2) должен быть основан на удовлетворении неравенства (10) или (14). Тогда можно определить два способа управления. Для первого способа, при отсутствии управляющего сигнала, выполнены пороговые условия для моды резонатора FP1. Это значит, что потери в секции CS выше значения α_i за счет межзонного поглощения непросветленной активной области. Сигнал управления в виде прямого тока (I_{contr}) компенсирует потери секции CS и обеспечивает выполнение неравенств (10) или (14). В результате генерация переключается с моды резонатора FP1 на моду резонатора FP2. Выключение сигнала управления восстанавливает остаточное поглощение секции CS, в результате происходит самопроизвольное переключение генерации с моды резонатора FP2 на моду резонатора FP1. Как видно из описанных выше принципов, величина I_{contr} определяет степень просветления секции CS, однако использование больших значений тока управления также позволит обеспечить условия, когда в секции CS будет происходить усиление. Результаты рас-

чета динамики таких переключений показаны на рис. 5. Видно, что в условиях, когда $\Delta G = 0$, для управления требуются токи выше порога просветления, однако при этом сохраняется преимущество заявленного подхода, и для тока накачки секции GS (I_{pump}) выполняется условие $I_{\text{contr}} \ll I_{\text{pump}}$. Второй способ управления реализуется в условиях, когда без управляющего сигнала выполнены пороговые условия генерации моды резонатора FP2. Физические причины, вызывающие генерацию моды FP2 без внешнего управления, связаны с двумя факторами. Первый фактор это частичное просветление активной области секции CS излучением секции GS. Вторым фактором это рассогласование спектров поглощения секции CS и усиления секции GS за счет уменьшения ширины запрещенной зоны активной области секции GS в результате экранировки межатомного потенциала накопленными носителями заряда [6,7] и частично температурного разогрева [8]. Компенсация остаточных потерь также может быть реализована за счет разнесения линий генерации, что формирует требуемую величину ΔG (рис. 2, c, d). Для второго способа управляющим сигналом будет обратное напряжение (U_{contr}), позволяющее экстрагировать накопленные в активной области фотогенерированные носители заряда и за счет квантово-размерного эффекта Штарка увеличить поглощение на длине волны генерации λ_2 в секции GS. Необходимо отметить, что значение выходной оптической мощности определяется амплитудой тока накачки секции усиления (I_{pump}), которая не меняется в процессе переключения. Все управление процессом переключения модовых структур происходит посредством приложения малосигнальных импульсов тока (I_{contr}) или напряжения (U_{contr}) к секции CS (рис. 1).

3. Экспериментальные результаты

В рамках экспериментальной части были исследованы особенности излучательных характеристик и переходных процессов в экспериментальных образцах многоволновых модуляторов, основные принципы функционирования которых были описаны выше. Исходя из изложенных выше рассуждений для первой экспериментальной реализации многоволновых модуляторов мы выбрали подход, схематически представленный на рис. 2, c, d. Экспериментальные образцы изготавливались на основе гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). Используемая гетероструктура включала широкозонные эмиттеры $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ *n*- и *p*-типа проводимости, волноводный слой на основе $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 0.5 мкм и активную область на основе двух квантовых ям InGaAs толщиной 8.5 нм каждая. Исследование излучательных характеристик полосковых лазеров Фабри–Перо показало, что внутренние оптические потери составляют 4.4 см⁻¹, а внутренний квантовый выход 85%, минимальное значение поро-

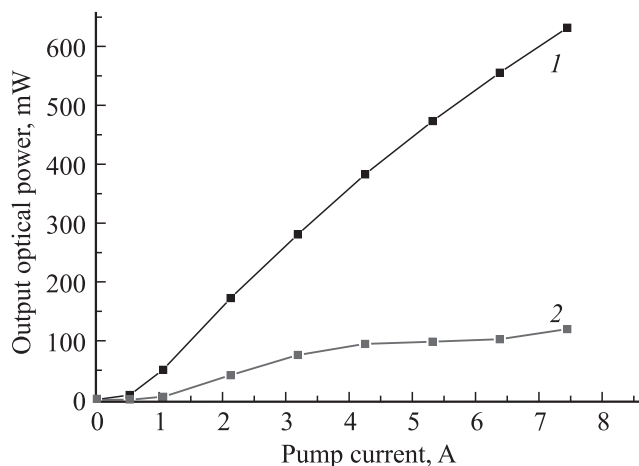


Рис. 6. Ватт-амперные характеристики модулятора, полученные при накачке секции GS импульсами тока длительностью 5 мкс, частотой 1 кГц, измеренные со стороны зеркала R_1 (1) и зеркала R_3 (2).

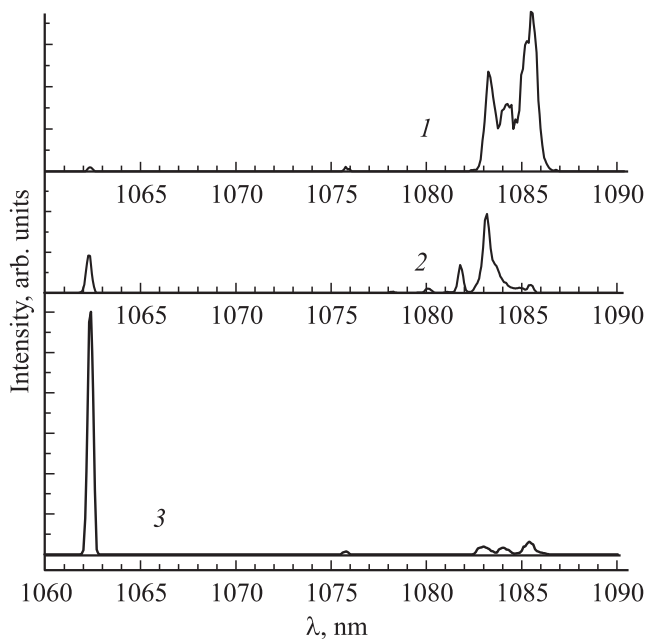


Рис. 7. Спектры излучения, полученные при накачке секции GS импульсами тока длительностью 5 мкс, частотой 1 кГц, амплитудой 4.2 А, измеренные со стороны зеркала R_3 (1), зеркала R_1 до (2) и после (3) приложения управляющего импульса.

говой плотности тока достигало 95 A/cm^2 . На основе гетероструктуры были изготовлены экспериментальные образцы модуляторов, для которых зеркала R_1 и R_3 формировались естественно сколотыми гранями, а функции зеркала R_2 выполняло распределенное брэгговское зеркало, характеристики которого и технология получения описаны в работе [5]. Брэгговское зеркало имело узкую линию отражения с шириной на уровне половины высоты максимума (FWHM) менее 0.5 нм

на длине волны 1062.34 нм. Длины резонаторов FP1 и FP2 составляли 1100 и 580 мкм соответственно, при этом протяженность секции CS составляла 580 мкм. Ширина излучающей апертуры равнялась 100 мкм. Результаты измерения ватт-амперных характеристик модулятора при накачке только секции GS импульсами тока длительностью 5 мкс и частотой 1 кГц показаны на рис. 6. Измерения спектров генерации при накачке только секции GS (рис. 7) показали, что излучение, выходящее со стороны зеркала R_1 , имеет как линию генерации резонатора FP1, обратную связь для которого формирует распределенное брэгговское зеркало, так и линию генерации резонатора FP2, являющуюся линией резонатора Фабри–Перо с зеркалами, сформированными сколотыми гранями. При этом доля моды резонатора FP1 составляет 60% от общей излучаемой мощности (рис. 6, кривая 1). Спектральный состав излучения, полученный со стороны зеркала R_3 , показал, что присутствует только линия резонатора FP2, т.е. используемое брэгговское зеркало R_2 обеспечивает достаточно эффективную оптическую изоляцию моды резонатора FP1 от секции CS. Для экспериментальной демонстрации эффекта управляемого переключения генерации мод резонаторов FP1 и FP2 использовалось управление прямым импульсом тока амплитудой 1 А и длительностью 600 нс, который прикладывался к секции CS. При этом секция GS накачивалась импульсами тока амплитудой 4.2 А большей длительности, так что управление происходило на фоне квазистационарной накачки секции GS. Спектры генерации, полученные со стороны зеркала R_1 до и после приложения управляющего импульса тока, показаны на рис. 7. Переходные процессы переключения лазерной генерации для мод резонатора FP1 и FP2 показаны на рис. 8. Видно, что импульс управления обеспечивает включение моды резонатора FP2 до уровня выходной оптической мощности, близкого к максималь-

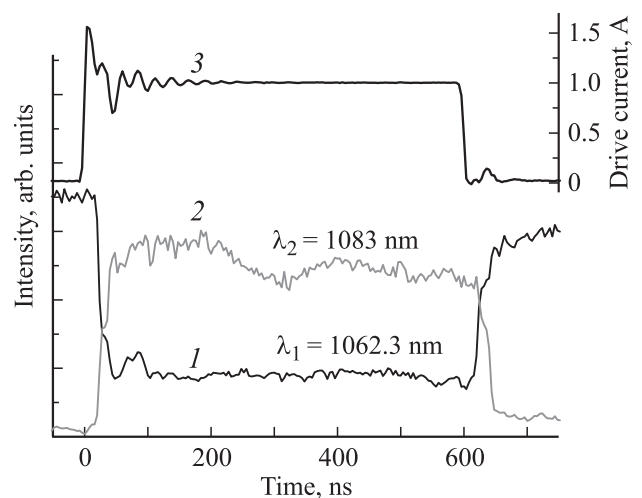


Рис. 8. Динамика лазерной генерации для мод резонаторов FP1 (1) и FP2 (2) при накачке секции GS током 4.2 А, а секции CS импульсом прямого тока амплитудой 1 А (3).

ному значению. При этом выключение генерации моды резонатора FP1 не является полным. Данный эффект связан с недостаточно низкими модальными внутренними оптическими потерями моды резонатора FP2 в связи с использованием непрокачиваемой части гетероструктуры в решеточной области. Полная длительность переходного процесса переключения режимов генерации мод резонаторов FP1 и FP2 составила 20 нс. Однако стоит отметить неоднородность фронта переключения, и в начале фронта включения можно выделить область, в которой более 50% от общей выходной оптической мощности переключается за 5 нс (рис. 8). Данный факт говорит о присутствии мод различной добротности и с разными временами жизни фотонов, что дает разные времена переключения.

4. Заключение

Таким образом, в рамках данной работы была предложена новая конструкция модулятора лазерного излучения, позволяющая использовать малосигнальное управление для переключения генерации между модовыми структурами в рамках одного монолитного кристалла. Ключевыми элементами являются зеркала, обеспечивающие селективное узкополосное отражение, и секция управления, обеспечивающая малосигнальное управление оптическими потерями. Показано, что в зависимости от остаточных оптических потерь в секции усиления могут быть подобраны необходимые параметры конструкции модулятора, обеспечивающие режим устойчивого малосигнального переключения лазерной генерации между выбранными модовыми структурами. Разработанные экспериментальные образцы многоволновых модуляторов подтвердили справедливость предложенных подходов для малосигнального управляемого переключения лазерной генерации между различными модами оптически интегрированных резонаторов Фабри–Перо. Показано, что использование распределенного брэгговского зеркала позволяет обеспечить эффективную оптическую изоляцию моды резонатора FP1 от секции CS. Показано, что потенциальное быстрое действие процесса управляемого переключения генерации между различными модами может быть на уровне единиц нс.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 8390.

Список литературы

- [1] E. Desurvire, C. Kazmierski, F. Lelarge, X. Marcadet, A. Scavanne, F.A. Kish, D.F. Welch, R. Nagarajan, C.H. Joyner, R.P. Schneider Jr., S.W. Corzine, M. Kato, P.W. Evans, M. Ziari, A.G. Dentai, J.L. Pleumeekers, R. Muthiah, S. Bigo, M. Nakazawa, D.J. Richardson, F. Poletti, M.N. Petrovich, S.U. Alam, W.H. Loh, D.N. Payne. *C. R. Physique*, **12**, 387 (2011).
- [2] Д.Ф. Зайцев. *Основы нанофотоники* (М., АКТЕОН, 2011).
- [3] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. *ФТП*, **40**, 1017 (2006).
- [4] X. Wang, P. Crump, H. Wenzel, A. Liero, T. Hoffmann, A. Pietrzak, C.M. Schultz, A. Klehr, A. Ginolas, S. Einfeldt, F. Bugge, G. Erbert, G. Trankle. *IEEE J. Quant. Electron.*, **46**, 658 (2010).
- [5] В.В. Золотарев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, В.В. Шамахов, И.Н. Арсентьев, Л.С. Вавилова, К.В. Бахвалов, И.С. Тарасов. *ФТП*, **47**, 110 (2013).
- [6] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, А.Л. Станкевич, Н.А. Рудова, А.Ю. Лешко, И.С. Тарасов. *ФТП*, **45**, 682 (2011).
- [7] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Ю. Лешко, И.С. Тарасов. *ФТП*, **45**, 672 (2011).
- [8] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, В.В. Забродский, И.С. Тарасов. *ФТП*, **45**, 1431 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Multi-wavelength integrated optical modulator of laser emission based on semiconductor heterostructures

S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, N.A. Pikhitin, V.V. Zolotarev, I.S. Shashkin, A.Y. Leshko, A.V. Lutetskiy, M.G. Rastegaeva, I.S. Tarasov, P.S. Kop'ev

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Design of optical modulator using small signal control and providing generation at several wavelength has been suggested. Spectral selective mirrors allowed forming optically integrated cavities and control section providing lasing at different wavelengths and optical losses change, respectively. Main correlations between mode switching conditions and optical modulator design parameters have been determined. Optical modulators with integrated Bragg mirror emitting at 1060–1080 nm have been developed and experimentally investigated. It has been shown that small signal control by direct current allows switching lasing between optically integrated Fabry–Perot cavities at 5–20 ns rate.