

УДК 621.373

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ФОТОНИКИ – СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

© 2009 г. М. Е. Белкин, А. С. Сигов

Поступила в редакцию 11.07.2008 г.

Рассмотрены основные цели и задачи, объекты исследования и важнейшие области применения сверхвысококачественной оптоэлектроники в современных и перспективных сетях и системах телекоммуникационного и радиолокационного назначений. Кратко анализируется уровень современного мирового развития в данной области, а также представлены результаты проводимых в последние годы в МИРЭА исследований и разработок.

ВВЕДЕНИЕ

В современном понимании фотоника – широкая область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Термин “фотоника” получает все большее распространение в отечественной науке и технике. В качестве конкретных примеров можно привести проводимую в Москве уже в течение ряда лет Международную выставку “Фотоника” и научно-технический журнал “Фотоника”. На стыке фотоники и традиционной электроники во второй половине XX в. возникло новое научно-техническое направление – оптоэлектроника, – которое, достигнув стадии промышленной зрелости, продолжает оставаться одним из наиболее актуальных. Это подтверждается его непрерывным развитием с выделением новых самостоятельных направлений, одним из которых является сверхвысококачественная оптоэлектроника (СВЧОЭ), появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники.

Основными объектами исследования СВЧОЭ являются полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, также узлы и модули на основе сочетания указанных элементов со сверхскоростной цифровой и СВЧ аналоговой компонентной базой электроники. Кратко цели и задачи нового направления можно сформулировать как исследования сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в СВЧ-диапазоне и их применения в различных оптических и СВЧ радиотехнических системах передачи информации, а также активных СВЧ-приборов и устройств (усилителей, генераторов, преобразователей частоты и т.д.) с оптическим управлением. Возникшая наряду с оптоэлектроникой СВЧОЭ продолжает развиваться в наши дни в направлении слияния с микро- и наноэлектроникой, результатом чего является создание оптоэлектронных интегральных схем.

Кроме того, СВЧОЭ можно считать важнейшей и неотъемлемой частью более общего направления, включающего также пассивные оптические (волоконно-оптические, интегрально-оптические) элементы и узлы, которое широко развивается за рубежом и известно под названием Microwave Photonics – “микроволновая фотоника”¹. Это направление формируется на стыке двух глобальных научно-технических областей, поэтому может быть определено в соответствии с [1] как направление СВЧ-техники, в котором параметры устройств и систем радиочастотного диапазона совершенствуются с помощью методов и средств оптического диапазона, а также как направление оптической техники, в которой для построения и оптимизации систем передачи в ИК-диапазоне используются методы и средства, развитые для устройств и систем СВЧ-диапазона.

Исследования в данном направлении начали проводиться с конца 70-х годов XX в. Отправной точкой для них служили потенциальные возможности по увеличению пропускной способности канала передачи информации, предоставляемые быстро развивающимися в те годы цифровыми волоконно-оптическими системами передачи (ВОСП), что требовало создания оптоэлектронных и электронных компонентов и устройств для преобразования и обработки сигналов с быстродействием в пикосекундном диапазоне. Преимущества основной элементной базы ВОСП, как, например, миниатюрность, широкополосность, низкое энергопотребление полупроводниковых лазеров и фотодиодов, низкие потери, нечувствительность к электромагнитным наводкам волоконного световода, а также простота принципов построения приемно-передающей аппаратуры, открывали перспективы совершенствова-

¹ Авторам известно о недопустимости термина “микроволновый” в отечественной научно-технической литературе и нормативной документации по СВЧ-технике. Однако здесь, в связи с отсутствием термина “сверхвысококачественная фотоника” – это просто “калька” с английского языка.

ния таких ключевых параметров существующих систем радиолокации, радиосвязи, телевизионного вещания, как пропускная способность, электромагнитная совместимость, массогабаритные характеристики. С годами интерес к данной тематике только продолжает увеличиваться, о чем, например, свидетельствуют уже восемь совместных специальных выпусков (начиная с 1990 г., последний в августе 2008 г.) в таких ведущих зарубежных журналах, как IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology и IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, а также создание специальных секций практически на всех крупных международных конференциях по СВЧ- и оптической технике и проведение ежегодной, специализированной, международной конференции научного общества IEEE.

В нашей стране работы в этом направлении, в основном связанные с теоретическими и экспериментальными исследованиями предельного быстродействия образцов из различных материалов, начались в 80-х годах сотрудниками университетских лабораторий и институтов Академии наук. В результате было создано направление, названное “пикосекундная оптоэлектроника” [2, 3], основной задачей которого было получение оптических импульсов сверхмалой длительности для прямых исследований сверхбыстрых явлений в области физики, химии и биологии.

В конце 80-х годов в ряде отраслевых НИИ были начаты исследования по разработке компонентной базы и устройств цифровых и аналоговых ВОСП для телекоммуникационных и антенных применений [4–5]. Сотрудники МИРЭА также принимали участие в этих работах [6–11], которые продолжались и в начале XXI в. [12–14].

1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Исследования в области СВЧОЭ на системном уровне связаны главным образом с развитием и оптимизацией следующих существующих и перспективных типов систем передачи информации:

- магистральных и локальных цифровых волоконно-оптических систем связи со скоростями в терабитном диапазоне;
- многоканальных аналоговых ВОСП с поднесущими в СВЧ-диапазоне для распределения сигналов спутникового и кабельного телевидения и радиолокационных применений;
- многоволновых аналоговых и цифровых ВОСП с плотным спектральным разделением (DWDM);
- цифровых и аналоговых радиосистем сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн для систем сотовой и персональной радиосвязи, беспро-

водных сетей доступа и локационных применений;

- сверхширокополосных систем радиолокации и радиосвязи (UWB).

В частности, для создания сверхвысокоскоростных цифровых ВОСП требуются источники света и достаточно чувствительные фотоприемники (не обязательно фотодиоды), способные генерировать и принимать оптические импульсы длительностью в субпикосекундном диапазоне и периодом следования того же порядка.

Основными задачами дальнейшего развития аналоговых ВОСП с поднесущими в УКВ- и СВЧ-диапазонах для кабельного и спутникового телевидения и локационных применений являются: повышение эффективности электрооптического и оптико-электрического преобразований сигналов модулирующих частот с целью значительного увеличения сквозного коэффициента передачи системы лазер-фотодиод; улучшение шумовых характеристик при применении лазеров простой структуры (например, с резонатором Фабри-Перо); снижение температурной чувствительности характеристик лазерного излучателя; повышение линейности характеристик преобразования большого сигнала. Решение указанных задач, по нашим расчетам (см. ниже), приведет к значительному упрощению и удешевлению оптического передающего и фотоприемного устройств, например, за счет отсутствия необходимости применения дорогостоящих лазеров с распределенной обратной связью (РОС), одновременно широкополосных, малошумящих и линейных СВЧ-усилителей, прецизионных систем термостабилизации лазеров. В конечном итоге это повысит экономические характеристики всей системы и обеспечит, например, возможность практической реализации интерактивных волоконно-оптических распределительных сетей – с доведением волокна до домов и квартир абонентов.

Бурно развивающиеся в настоящее время многоволновые ВОСП со спектральным разделением для магистральных и локальных применений необходимо, в первую очередь, обеспечить стабильными, надежными и достаточно монохроматичными (ширина линии на уровне 1 МГц) источниками излучения, способными простым путем и с высокой скоростью перестраиваться в полосу до нескольких терагерц.

Уровень и скорость распространения радиосистем сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн с оптическим управлением для систем сотовой и персональной радиосвязи, беспроводных сетей доступа и локационных применений будет в основном определяться как совершенствованием указанных выше параметров традиционных оптоэлектронных компонентов, так и созданием новых функциональных СВЧ-элементов, например так называемых фотонных антенн [15], представляющих собой объединенные на общей полупроводни-

ковой подложке фотодиод или фототранзистор с линейным выходным уровнем СВЧ-сигнала порядка 10 мВт и полосковую печатную антенну, оптоэлектронных СВЧ-вентилей [16] с уровнем развязки более 80 дБ, а также различных оптоэлектронных логических схем обработки сигналов [17].

Важным применением СВЧОЭ в перспективных сверхширокополосных системах радиосвязи и радиолокации [18] на близкие расстояния, основанных на передаче видеоимпульсов пикосекундного диапазона и когерентных методах приема и обработки сигналов, будет создание и практическое внедрение оптоэлектронной пары (оптрона), обеспечивающей формирование и управление (например, путем цифровой позиционно-импульсной модуляции) моноимпульсами.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МИРОВЫХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СВЧОЭ

Современный уровень зарубежных разработок в области СВЧОЭ в основном определяется расширением полосы пропускания оптоэлектронной компонентной базы. Так, в исследовательских лабораториях разработаны лазерные модули для ВОСП с полосой до 30 ГГц при непосредственной модуляции током инжекции и до 70 ГГц при внешней модуляции, а также *p-i-n*-фотодиоды с полосой до 110 ГГц [19]. Кроме того, изучаются особенности и основные характеристики различных функциональных СВЧ-элементов с оптическим управлением, а также узлы и устройства на их основе для будущих систем связи и радиолокации, среди которых наиболее перспективной считается комбинированная волоконно-эфирная система Radio-over-Fiber, (RoF) [20].

В качестве наиболее типичного примера можно привести оптоэлектронный генератор, в котором для получения низких фазовых шумов используется оптический энергоаккумулирующий элемент [21]. Данный функциональный узел представляет собой принципиально новый подход к созданию прецизионных источников сигналов диапазона от сотен мегагерц до сотен гигагерц с прямым управлением. Также получены обнадеживающие перспективы в направлении улучшения характеристик СВЧ-генераторов за счет дополнительного оптического управления [22]. Основная идея здесь заключается в возможности улучшить характеристики СВЧ-устройства за счет разрешения извечного компромисса между параметром качества и диапазоном перестройки, а также уменьшить требуемое число схемных элементов в интерфейсном устройстве между волоконно-оптической линией и радиолнией в комбинированной волоконно-эфирной системе. В связи с быстрым развитием беспроводных сетей диапазона 60 ГГц большой интерес исследователи также проявляют к транзисторным оптоэлектронным смесителям на гармониках [23]. Привлекатель-

ная сторона использования для этой цели фототранзисторов с высокой подвижностью электронов заключается в получении внутреннего усиления фотосигнала на таких высоких частотах. Последние годы характеризуются началом процесса перехода от исследования и разработки отдельных оптоэлектронных элементов и узлов к созданию оборудования и радиосистем миллиметрового диапазона на базе этих элементов. В качестве одного из наиболее ярких примеров можно привести разработку японской фирмы NTT [24], которой элементы СВЧОЭ использовали для генерации, модуляции и радиоизлучения сигналов диапазона 120 ГГц в приемопередающем оборудовании беспроводной локальной сети Ethernet на скорость 3 Гбит/с.

3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СВЧ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

Принципиальными компонентами ВОСП, а также рассматриваемых узлов СВЧОЭ являются излучатели (в основном полупроводниковые лазеры) и фотоприемники (в основном полупроводниковые фотодиоды). Техничко-экономические преимущества их хорошо известны и описаны в большом числе отечественных и иностранных научно-технических публикаций. Также известны их основные недостатки как элементов линейного тракта системы передачи информации, заключающиеся в сравнительно малой эффективности электрооптического и оптико-электрического преобразований сигналов, которая еще больше уменьшается при работе системы на частотах СВЧ-диапазона.

Для конкретной оценки ниже приводятся результаты проведенно нами [25, 26] анализа путей улучшения таких важных характеристик полупроводниковой оптоэлектронной пары излучатель–фотоприемник², как коэффициент передачи и коэффициент шума в полосе до сверхвысоких частот. Данная структура, по сути, почти идентична аналоговой ВОСП с СВЧ поднесущей, поэтому представляется корректным при ее рассмотрении воспользоваться результатами анализа этого типа волоконно-оптических систем [27].

Общий принцип анализа ВОСП как системы передачи заключается в представлении ее в виде направленного четырехполюсника, содержащего каскадно соединенные лазерный модуль (ЛМ), волоконно-оптический тракт и фотодиодный модуль (ФДМ). К его входным полюсам подключен узел

² В целях максимального приближения объекта исследования к реальным условиям его работы в составе ВОСП здесь и далее, при отсутствии специальной оговорки, считаем, что излучатель и фотоприемник связаны при помощи короткого отрезка одномодового световода с пренебрежимо малыми потерями и полосой пропускания, существенно превышающей полосу модуляции, что не снижает общности рассмотрения.

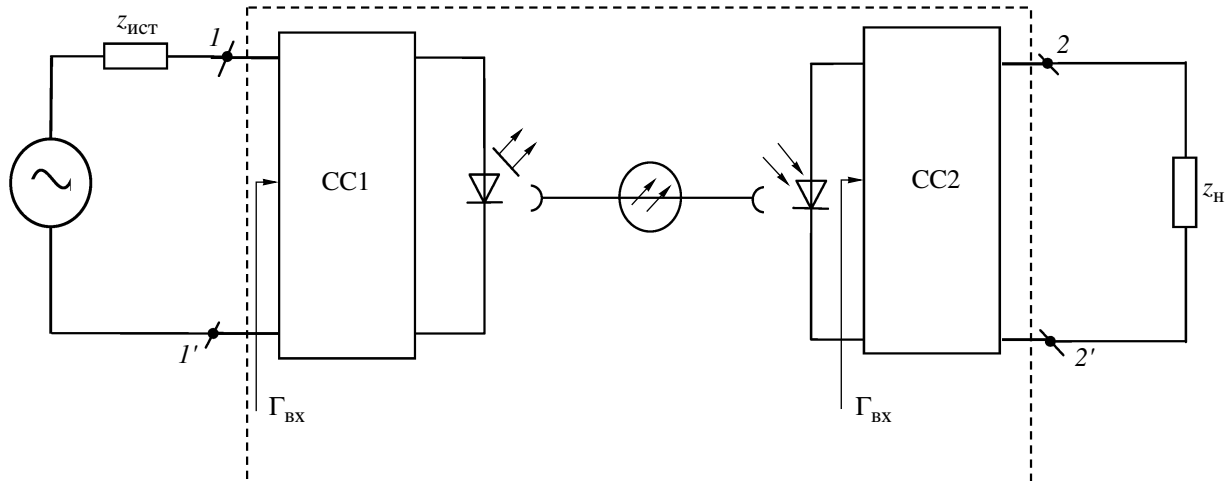


Рис. 1. Модель исследуемой оптоэлектронной пары: CC1, CC2 – схемы согласования, 1, 1' – входные клеммы, 2, 2' – выходные клеммы.

источника модулирующих радиосигналов, к выходным – узел обработки радиосигналов. Такой подход позволяет характеризовать ВОСП с помощью стандартных параметров радиотехнических устройств: коэффициента передачи и коэффициента шума. Однако в случае анализа ВОСП с СВЧ поднесущей необходимо учитывать функционирование лазерного и фотодиодного модулей в СВЧ-диапазоне. А именно, входной импеданс ЛМ и выходной импеданс ФДМ должны быть корректно согласованы соответственно с выходным импедансом источника сигнала и импедансом нагрузки во всей полосе модулирующих частот ВОСП. Для этой цели в ВОСП используются пассивные схемы согласования двух типов: диссипативная (т.е. с потерями) и недиссипативная на основе реактивных элементов [9]. Диссипативная схема строится на основе последовательного резистора, сопротивление которого в сумме с сопротивлением соответствующего оптоэлектронного компонента равно сопротивлению источника сигнала либо нагрузки, и, в принципе, более широкополосна. Поэтому она повсеместно применяется в высокоскоростных цифровых ВОСП, а также в многоканальных аналоговых ВОСП для кабельного телевидения с шириной полосы модуляции более четырех октав. Недиссипативная схема более узкополосна, тем не менее, как известно из практики разработки СВЧ-систем, относительная полоса согласования, например по уровню потерь 3 дБ, может превышать 80%. Модель исследуемой оптоэлектронной пары представлена на рис. 1.

Коэффициент передачи G ВОСП на основе данной модели определяется в соответствии с [27] следующим выражением с учетом отсутствия предва-

рительного усилителя приемного оптоэлектронного модуля (ПРОМ):

$$G(f_i) = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{и}}} = \frac{1 - |\Gamma_{\text{вх}}|^2}{2\text{Re}(z_{\text{вх.л}})} \times \left[\eta_{\text{л}}(I_{\text{с}_0}, f_i, m_i)(y_{\text{п}})^{-1} N_1 \times 10^{\frac{A l + n N_2}{10}} N_3 R_0 k_{\text{фд}} k_{\text{вх}} \right]^2 \times \text{Re}(z_{\text{н}}). \quad (1)$$

Здесь f_i – частота СВЧ поднесущей i -го канала многоканальной аналоговой ВОСП; $P_{\text{и}}$ – мощность источника сигнала i -го канала; $P_{\text{н}}$ – мощность в нагрузке; $|\Gamma_{\text{вх}}|$ – модуль коэффициента отражения по входу; $z_{\text{вх.л}}$ – входной импеданс лазерного модуля; $\eta_{\text{л}}$ – квантовая эффективность лазера, Вт/А; $I_{\text{с}_0}$ – постоянный ток смещения лазера; m_i – глубина модуляции излучения по i -му каналу; $y_{\text{п}}$ – потери в оптическом изоляторе; N_1 – коэффициент ввода излучения в волоконный световод; A – погонные потери в оптическом тракте, дБ/км; l – длина оптического тракта, км; n – количество сращиваний волокна в оптическом тракте; N_2 – средние потери на срастках, дБ; N_3 – коэффициент ввода излучения в фотодиод; R_0 – номинальная чувствительность фотодиода, А/Вт; $k_{\text{фд}}$ – коэффициент передачи фотодиода; $k_{\text{вх}}$ – коэффициент передачи входной цепи ПРОМ; $z_{\text{н}}$ – импеданс нагрузки.

Преобразуем данное выражение в более удобную для анализа форму. Для этого представим правую часть в виде трех составляющих, отражающих соответственно электрооптическое преобразование, оптические потери и оптико-электрическое преобразование. Влияние схем согласования импеданса источника сигнала и входного импеданса ла-

зерного излучателя, а также импедансов фотодиода и нагрузки учтем путем введения параметров, которые назовем потерями за счет диссипативного согласования соответствующих элементов. Тогда (1) преобразуется к следующему виду:

$$G = \frac{(\eta'_n)^2 \eta_0^2 (\eta'_{fd})^2}{L_1 L_2}, \quad (2)$$

где

$$L_1 = R_n / R_n \quad (3)$$

– потери за счет диссипативного согласования импеданса лазера; $R_n = \text{Re}(Z_n)$, $R_n = \text{Re}(Z_{вх.л})$;

$$L_2 = (R_{fd} + R_n) / R_{fd} \quad (4)$$

– потери за счет диссипативного согласования импеданса фотодиода, $R_{fd} = \text{Re}(Z_{fd})$, $R_n = \text{Re}(Z_n)$, Z_{fd} – импеданс фотодиода. Кроме того, $\eta'_n = \eta_n \gamma_n^{-1} N_1$ – реальная квантовая эффективность лазерного модуля с учетом потерь на ввод излучения в волоконный световод и потерь в оптическом

изоляторе; $\eta_0 = 10^{\frac{Al + nN_2}{10}}$ – потери в оптическом тракте; $\eta'_{fd} = N_3 R_0$ – реальная чувствительность фотодиодного модуля с учетом потерь на стыковку волокна и его фоточувствительной площадки. Выражение (2) для коэффициента передачи ВОСП удобнее представить в логарифмической форме:

$$G = 20 \lg(\eta'_n) + 20 \lg(\eta_0) + 20 \lg(\eta'_{fd}) - 10 \lg(L_1) - 10 \lg(L_2), \text{ дБ}. \quad (5)$$

Оценим величину коэффициента передачи ВОСП с СВЧ поднесущими, выбрав типичные значения $\eta'_n = 0.2 \text{ Вт/А}$ и $\eta'_{fd} = 0.7 \text{ А/Вт}$ и пренебрегая потерями в коротком волоконно-оптическом тракте ($\eta_0 = 1$). Для упрощения анализа будем считать все согласуемые импедансы чисто активными и примем типичные значения сопротивлений источника и нагрузки $R_n = R_n = 50 \text{ Ом}$ и полученные по экспериментальным данным [27] значения сопротивлений лазера и фотодиода: $R_n = 4 \text{ Ом}$, $R_{fd} = 10 \text{ Ом}$. Подставив указанные значения в (3)–(5), получим коэффициент передачи: $G = -36 \text{ дБ}$, что с достаточной точностью соответствует экспериментальным данным [25].

Рассмотрим другой основной параметр модели рис. 1: коэффициент шума. По одному из определенных дифференциальный коэффициент шума четырехполосника соответствует [28]

$$\text{Ш} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.ист} G(f_i)}, \quad (6)$$

где $P_{ш.вых}$ и $P_{ш.ист}$ – мощности шумов в полосе 1 Гц соответственно в нагрузке и на выходе источника

сигнала, $G(f_i)$ – коэффициент передачи на частоте f_i (далее – G). Мощность тепловых шумов источника в единичной полосе определяется стандартно $P_{ш.ист} = kT$ (k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура), и при комнатной температуре она равна $4.1 \times 10^{-21} \text{ Вт/Гц}$. В (6) мощность шумов на выходе складывается из мощности собственных шумов четырехполосника $P_{ш.соб}$ и мощности шумов источника, умноженной на коэффициент передачи четырехполосника. Таким образом, выражение для коэффициента шума можно преобразовать в виде

$$\text{Ш} = \frac{P_{ш.соб} + P_{ш.ист} G}{P_{ш.ист} G} = 1 + \frac{P_{ш.соб}}{P_{ш.ист} G}. \quad (7)$$

Оценим с помощью (7) величину коэффициента шума рассматриваемой оптоэлектронной пары. Для корректности оценки значение собственных шумов на выходе четырехполосника возьмем из результатов расчета спектральной плотности шумов на выходе аналоговой ВОСП [27] при типичной величине относительного шума интенсивности лазера (ОШИ)³, равной -130 дБ/Гц и входной оптической мощности порядка 1 мВт (область преобладания влияния ОШИ на общую шумовую характеристику ВОСП): $P_{ш.соб} = -190 \text{ дБВт/Гц}$ ($1 \times 10^{-19} \text{ Вт/Гц}$). При подстановке приведенных выше значений в (7) получаем $\text{Ш} = 97562$ (50 дБ). Следовательно, данную оптоэлектронную пару можно рассматривать как очень сильно шумящее устройство.

Из проведенных количественных оценок, основанных на типичных параметрах современных лазеров и фотодиодов, можно сделать однозначный вывод: использование оптоэлектронной пары в СВЧ-устройствах и системах должно привести к значительному ухудшению их параметров, если не принять специальных мер по увеличению ее коэффициента передачи и уменьшению коэффициента шума. Возможные меры четко следуют из (5) и (7). А именно, применение согласования (в идеальном случае $L_1 = L_2 = 1$) приведет к увеличению коэффициента передачи до -17 дБ и соответствующему уменьшению коэффициента шума до 31 дБ. Более радикальный подход может заключаться в сочетании согласования с разработкой специального полупроводникового лазерного излучателя с значительно большей квантовой эффективностью.

Желаемый эффект был получен и исследован теоретически и экспериментально двумя университетскими научными группами из США под руководством К. Лау [29] и К. Вахала [30]. Эффект наблюдался в квантоворазмерном лазере с двухсекционной схемой токовой накачки, представляющей собой две электрически изолированные области су-

³ Также часто используется аббревиатура RIN (Related Intersity Noise).

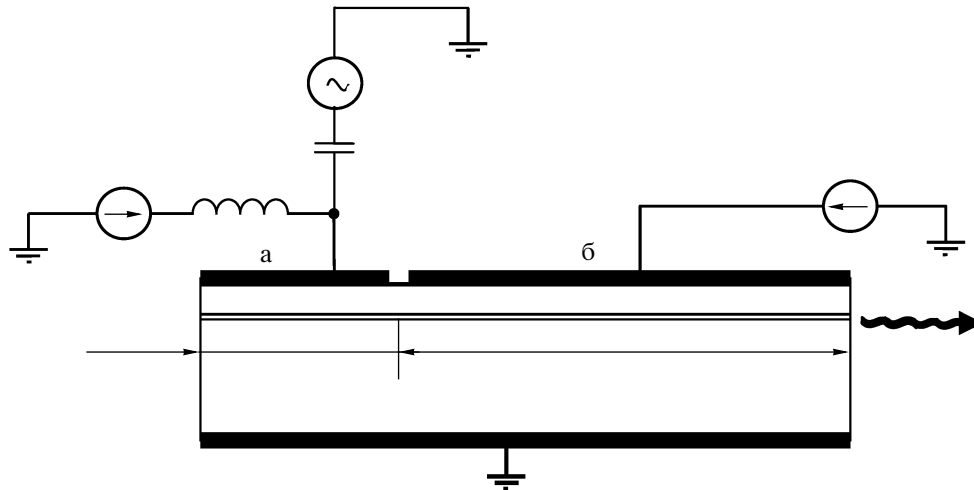


Рис. 2. Схема двухсекционного полупроводникового лазера.

щественно различных размеров (рис. 2, а – секция модуляции, б – секция усиления) с общим оптическим волноводом. Схема лазера представлена на рис. 2 [29].

Эффект повышения квантовой эффективности, названный “gain lever”, основан на ярко выраженном насыщении зависимости дифференциального оптического усиления от концентрации носителей в квантоворазмерном лазере при различных уровнях тока инжекции в областях а и б (максимальный эффект получается, когда область а смещается ниже порога генерации). Схема рис. 2 давно используется отечественными исследователями для создания мощных оптических генераторов ультракоротких импульсов как с помощью обычных гетеролазеров [31], так и лазеров с квантовыми точками [32].

Оптимизация режимов работы и структуры указанного лазера позволила увеличить его внешнюю квантовую эффективность $\eta_{\text{л}}$ до 20 Вт/А. Рассчитаем с помощью (5) и (7) коэффициент передачи и коэффициент шума ВОСП для данной величины $\eta_{\text{л}}$. С учетом потерь в изоляторе и на ввод в волокно реальная квантовая эффективность $\eta'_{\text{л}} = 6.2$ Вт/А. При этом коэффициент передачи системы: $G = +13$ дБ. Соответственно, уменьшается коэффициент шума: $\text{Ш} = 2.2$ (3.4 дБ).

При таких параметрах передачи рассматриваемая оптоэлектронная пара уже не только не будет оказывать ухудшающее влияние на характеристики управляемых устройств, но и может самостоятельно использоваться, например, как сверхширокополосный маломощный СВЧ-усилитель с практически полной развязкой входа и выхода. Однако лазер данного типа вследствие использования режима допорогового смещения должен обладать плохими модуляционными характеристиками, и необходимы дополнительные исследования для их улучшения.

Как известно, полоса модулирующих частот лазерного излучателя расширяется с увеличением его оптической мощности. То есть при использовании рассматриваемых оптоэлектронных компонентов в СВЧ-устройствах, помимо ухудшения шумовых характеристик, будет возникать другая проблема, связанная с линейностью оптико-электрического преобразования фотодетектора. Данная проблема приобретает особую важность при разработке упомянутых выше фотонных антенн, поскольку фотодиод в них используется не только как приемник оптических сигналов, но и как передатчик СВЧ-сигналов. Согласно проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям [33] граница линейности с точки зрения удовлетворения требований для многоканальных аналоговых систем передачи в обычном *p-i-n*-фотодиоде соответствует уровню входной оптической мощности примерно 2 мВт, что явно недостаточно для данного случая.

Для решения этой проблемы в конце 90-х годов был разработан новый тип фотодиода с полосой в СВЧ-диапазоне [34] на основе одного типа фотоносителей (*uni-travelling-carrier*, UTC). По конструкции он представляет собой традиционный мезоструктурный фотодиод с обратной засветкой. Однако, в отличие от последнего, в его поперечной структуре имеется отдельный фотопоглощающий слой *p*-типа и широкозонный обедненный слой с собственной проводимостью. При образовании под действием облучения электронно-дырочных пар основными носителями являются дырки, которые быстро движутся к коллектору. Электроны же на пути к базе пролетают слой с собственной проводимостью, где получают дополнительное ускорение. Более высокая подвижность электронов и дополнительное ускорение в *i*-слое приводят к уменьшению пролетного времени и, следовательно, к увеличению поло-

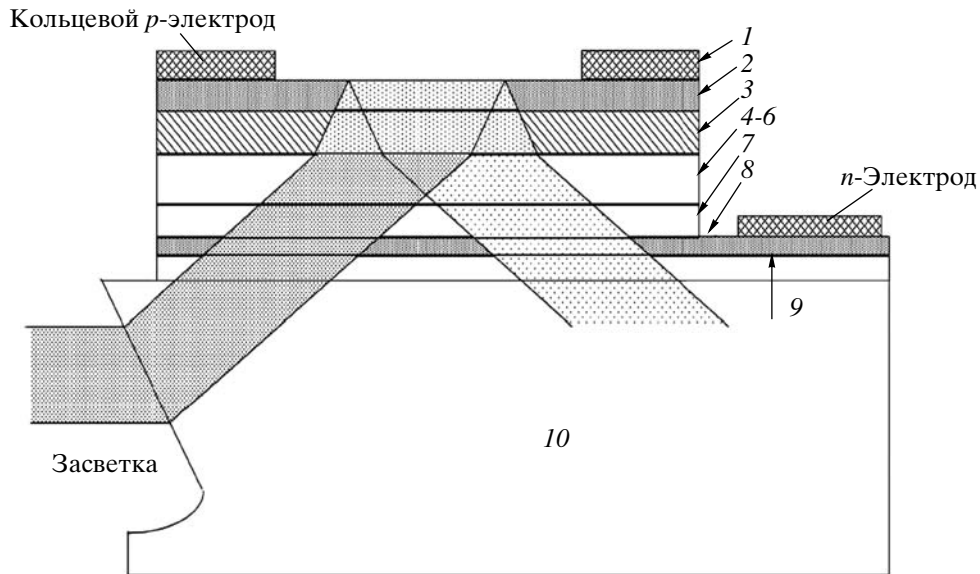


Рис. 3. Поперечная структура и основные слои фотодиода типа UTC-RF (пояснения слоев 1–10 см. в таблице).

сы пропускания по сравнению с обычным *p-i-n*-фотодиодом с таким же диаметром мезы.

Использование в качестве фотоносителей быстрых электронов также приводит к большему уровню мощности насыщения фототока, поскольку влияние пространственного заряда становится заметным при более высоких уровнях входной оптической мощности. Согласно экспериментальным данным в фотодиоде рассматриваемого типа можно достичь выходной мощности СВЧ-сигнала на нагрузке 50 Ом порядка 10 мВт на частотах 10...12 ГГц и порядка 2...4 мВт на частотах 100...200 ГГц. Причем значение точки пересечения характеристики интермодуляционных искажений третьего порядка (*IP3*) находится на уровне 30...50 дБм, что соответствует требованиям, например, к аналоговой СВЧ ВОСП, применяемой для передачи 30-ти и более телевизионных каналов

[27]. Входная оптическая мощность в таком фотодиоде может достигать 100 мВт.

Тем не менее с помощью описанной выше фотодиодной структуры не решается другая важная проблема, заключающаяся в том, что для расширения полосы пропускания повсеместно используемых фотодиодов с вертикальной засветкой необходимо уменьшать диаметр фоточувствительной площадки (см. ниже). Однако при этом существенно ухудшается его характеристика оптико-электрического преобразования за счет одновременного уменьшения коэффициентов N_3 , R_0 и $k_{фд}$ в выражении (1). Наиболее перспективным вариантом преодоления указанной проблемы считается использование конструкции фотодиода с боковой засветкой через подложку (refracting-Facet, RF) [35]. Поперечная структура фотодиода типа UTC-RF представлена на рис. 3, структура слоев – в таблице.

Структура слоев

	Назначение	Материал	Параметры
1	Верхнее покрытие	p^+ -InGaAsP	$\lambda_g = 1.45$ мкм, $t = 0.13$ мкм, легировано С, $p = 2 \times 10^{19}$ см ⁻³
2	Поглощающий слой	p -InGaAs	$t_{\text{погл}} = 0.452$ мкм
3	Разделительный слой (Спейсер)	i -InGaAs	$t = 0.018$ мкм
4	Разделительный слой (Спейсер)	InP	$t = 0.006$ мкм, нелегировано
5	Барьерный слой	n -InP	$t = 0.007$ мкм, легировано Si
6	Коллектор	InP	$t = 0.29$ мкм, нелегировано
7	Субколлектор	n^+ -InP	
8	Ограничение травления	n^+ -InGaAsP	$\lambda_g = 1.29$ мкм, $t = 0.04$ мкм
9	Субколлектор	n^+ -InP	$\lambda_g = 0.92$ мкм
10	Подложка	Полуизолированный InP	скошен торец

К наиболее важным преимуществам фотодиода такой структуры относятся:

- 1) экономичность за счет упрощения схемы оптического ввода;
- 2) высокая чувствительность;
- 3) широкая полоса пропускания;
- 4) высокая мощность насыщения (линейность характеристики опτικο-электрического преобразования);
- 5) совместимость с оптоэлектронными интегральными схемами.

В ходе экспериментального исследования параметров структуры на рис. 3 получены следующие основные результаты [35]:

Токовая чувствительность (1.55 мкм)	1 А/Вт
Полоса пропускания	не менее 30 ГГц
Рабочий фототок	не более 20 мА

4. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ С ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В последние годы МИРЭА активно участвует в исследованиях и разработках в области сверхвысокочастотной оптоэлектроники. В частности, фундаментальные исследования в этом направлении выполнялись в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.) по проекту “Исследование принципов создания функциональных СВЧ-элементов на основе взаимодействия света с пленочными полупроводниковыми и диэлектрическими структурами”. Кроме того, совместно с Институтом общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН) и Физико-техническим институтом имени А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН) проводятся прикладные исследования и разработка полупроводниковых лазеров и фотодиодов с полосой пропускания в СВЧ-диапазоне для перспективных ВОСП телекоммуникационного и радиолокационного применений. Научные исследования по разработке лазера выполняются в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы” по теме “Исследование технологии и разработка методов создания полупроводниковых приборно-ориентированных наногетероструктур высокоэффективных лазеров в спектральной области 1.3...1.5 мкм для перспективных волоконно-оптических систем телекоммуникационного и радиолокационных применений”⁴. Исследования фотодетекторов для перспективных воло-

конно-оптических и пространственных оптических систем проводятся по программе “Исследование возможности создания и технологии получения приборно-ориентированных наногетероструктур и сверхбыстродействующих фотодетекторов на их основе в ближнем и среднем ИК-диапазонах”⁵.

Основные задачи научно-технологических исследований, проводимых ИОНХ РАН и ФТИ РАН в рамках данных НИР, состоят в изучении предельных возможностей жидкофазной эпитаксии и разработке на ее основе лазерных и фотодиодных гетероструктур с объемной активной областью [36, 37] и создании квантоворазмерных гетероструктур с указанными выше целевыми показателями методом газофазной эпитаксии. Основная задача МИРЭА заключается в моделировании работы и характеристик исследуемых лазерных и фотодиодных гетероструктур и экспериментальном исследовании макетных образцов в СВЧ-диапазоне. Приведем наиболее важные результаты наших исследований.

Полупроводниковый лазер с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции [26, 38–41]

Цель работы заключалась в создании эффективного лазерного излучателя для перспективных локальных распределительных сетей, в которых требования к энергетическому потенциалу определяются не затуханием в волоконно-оптическом тракте, а потерями в многополюсных пассивных оптических разветвителях.

Основные целевые показатели

Спектральная полоса	1.3...1.5 мкм
Произведение средней мощности на полосу модуляции	не менее 300 мВт ГГц (30 мВт, 10 ГГц)
Пороговый ток	не более 20 мА

Согласно проведенным аналитическим исследованиям перспективной лазерной структурой, обеспечивающей высокое произведение средней мощности на полосу модуляции, является лазер с зарощенной серповидной активной областью (Buried Crescent Laser). Его поперечная структура, принятая для моделирования, представлена на рис. 4.

Основными технологическими особенностями данной структуры с точки зрения одновременного получения высоких средней мощности и полосы модуляции являются:

- 1) формирование структуры на подложке InP *p*-типа;
- 2) двухэтапный процесс изготовления: на первом этапе формируется *n-p*-переход, блокирующий активную область в поперечном направлении, на вто-

⁴ Госконтракт № 02.513.11.3170.

⁵ Поддержаны грантом РФФИ № 07-07-12087-офи.

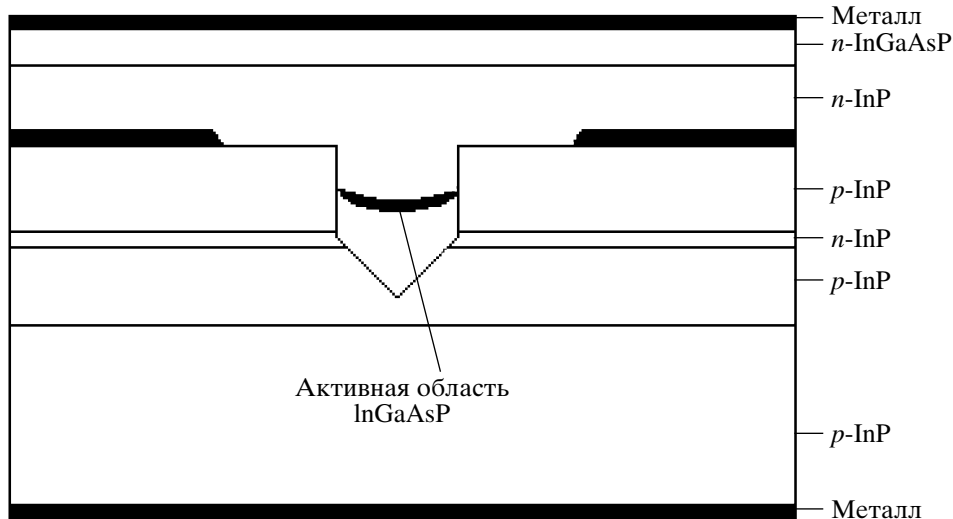


Рис. 4. Поперечная структура лазерного диода с серповидной активной областью на основе InGaAsP/InP.

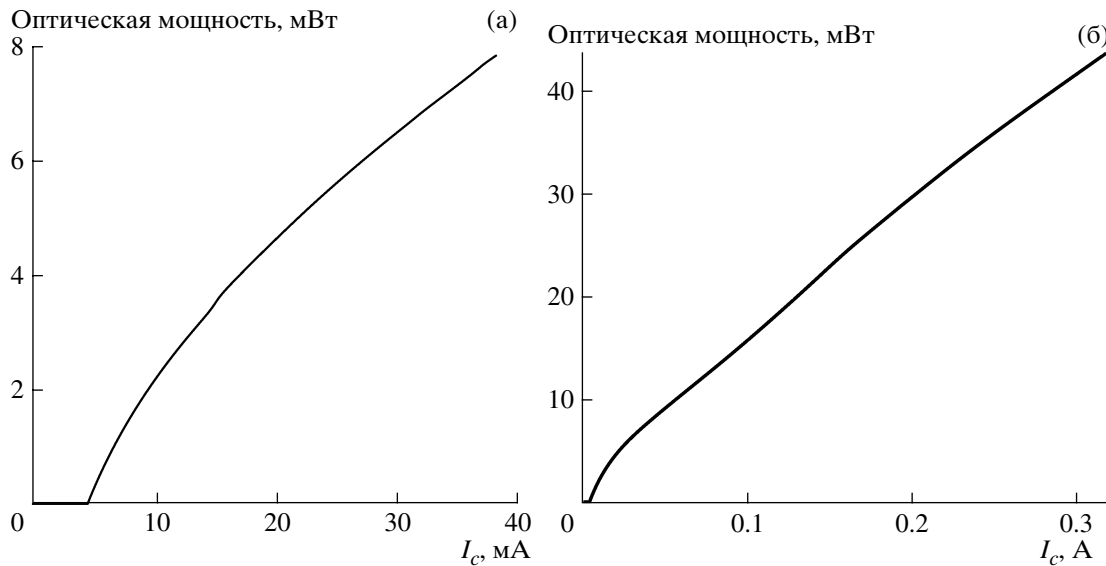


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика моделируемой лазерной структуры: а – начальный участок; б – полная ВтАХ.

ром вытравливается стреловидная канавка, в которой в процессе последующего эпитаксиального наращивания формируется активная область на основе четверного раствора InGaAsP, автоматически получающаяся в виде серпа.

Моделирование, анализ и оптимизация параметров данной структуры проводились в приборно-технологической системе автоматизированного проектирования SYNOPSIS Sentaurus T-CAD⁶. Результаты расчета ватт-амперной характеристики (ВтАХ)

представлены на рис. 5. Как следует из рис. 5а, пороговый ток получился на уровне 4 мА, что значительно превышает соответствующий целевой показатель. Другой целевой показатель (средняя мощность 30 мВт) обеспечивается при токе лазера 200 мА (рис. 5б). Полученная в ходе моделирования ВтАХ с погрешностью в пределах 5% совпала с результатами экспериментального исследования⁷, что свидетельствует о корректности расчетной модели. На рис. 6 приведено пространственное распределение оптического поля. Высокая округлость пятна свидетельствует о возможности эффективного ввода

⁶ Разработка программ и расчеты характеристик лазерной и фотодиодной структур проведены студентом 4-го курса факультета электроники МИРЭА Н.А. Дзичковским.

⁷ Измерения проводились в ИОНХ РАН.

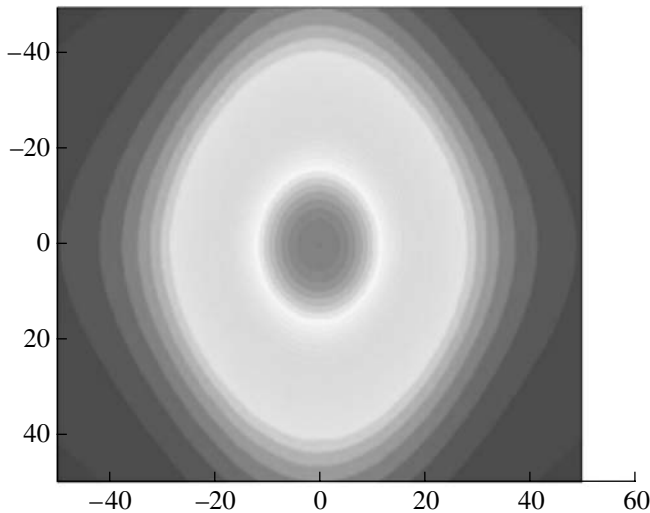


Рис. 6. Пространственное распределение оптического поля.

излучения лазера в круглый волоконный световод (увеличения коэффициента N_1 в выражении (1)), что является еще одним преимуществом исследуемой лазерной структуры.

Результаты моделирования частотно-модуляционной характеристики (ЧМХ) исследуемой лазерной структуры при различных токах инжекции I представлены на рис. 7. Отметим, что для удобства анализа здесь по оси ординат отложены нормированные значения оптической мощности P (в дБ) по отношению к мощности на частоте 100 МГц. Как

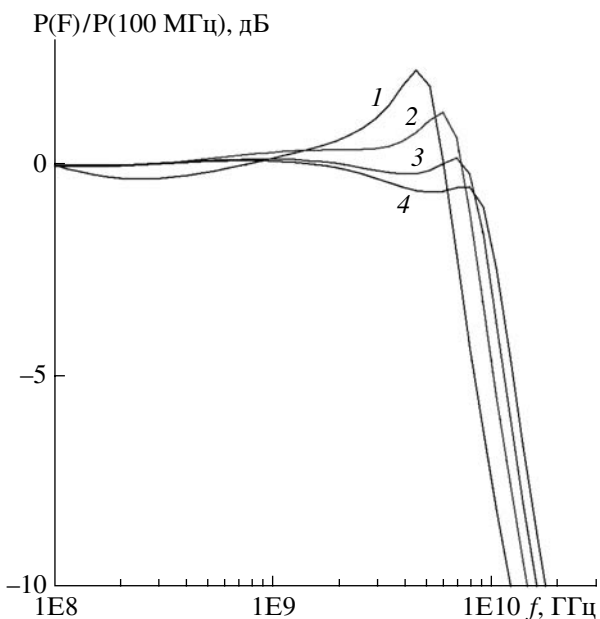


Рис. 7. Расчетные ЧМХ лазерной структуры с серповидной активной областью: $I = 40$ (1), 80 (2), 120 (3) и 160 мА (4).

видно из рисунка, соответствующий целевой показатель НИР (полоса модуляции 10 ГГц) уже обеспечивается при токе порядка 120 мА. Приведенные выше данные расчета ЧМХ с достаточно высокой точностью подтверждаются результатами измерения изготовленных в ИОНХ РАН макетных образцов лазерных диодов, которые получены с использованием измерительного фотодиода модели 1414 фирмы New Focus, Inc., США (полоса пропускания 25 ГГц) и векторного анализатора цепей модели E8363B фирмы Agilent Technologies. Пример ЧМХ лазера при токе инжекции 120 мА представлен на рис. 8.

Фотодиод p - i - n -типа с полосой пропускания в СВЧ-диапазоне [38, 42]

Цель работы – создание сверхбыстродействующего p - i - n -фотодиода для перспективных ВОСП телекоммуникационного и радиолокационного назначения.

Целевые показатели для моделирования

Спектральная полоса	1.3...1.6 мкм
Полоса пропускания	не менее 30 ГГц
Чувствительность по постоянному току и в области низких частот	не менее 0.9 А/Вт
Темновой ток	не более 10 нА

Для определения поперечной конструкции гетероструктур и способа их засветки были изучены и проанализированы существующие принципы и методы создания сверхбыстродействующих фотодиодов. В результате для моделирования была выбрана наиболее распространенная мезаструктура с зарращиванием полуизолятором и вертикальный способ засветки со стороны мезы. Основными достоинствами такого способа засветки являются: низкие поляризационные потери, независимость от длины волны, низкие потери на ввод из одномодового световода, возможность использования стандартных корпусов. Общий вид фотодиодной структуры для проведения моделирования представлен на рис. 9.

Как следует из рисунка, пятислойная меза выращивается на подложке n -типа из фосфида индия. Выбранные для моделирования начальные концентрации носителей в слоях 1–5 соответствуют $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (слой 1), $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (слой 2), $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (слой 3) и $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (слои 4, 5); подложка $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщины эпитаксиальных слоев мезы: 0.5 (1), 2 (2), 1 (3), 3 (4) и 2 мкм (5). Толщина подложки 300 мкм, диаметр верхушки мезы 50 мкм, размеры кристалла 300×300 мкм. В поглощающем слое применены многокомпонентные материалы состава $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ либо $\text{Ga}_{0.27}\text{In}_{0.73}\text{As}_{0.63}\text{P}_{0.37}$. В слое 2 использован широкозонный материал InP .

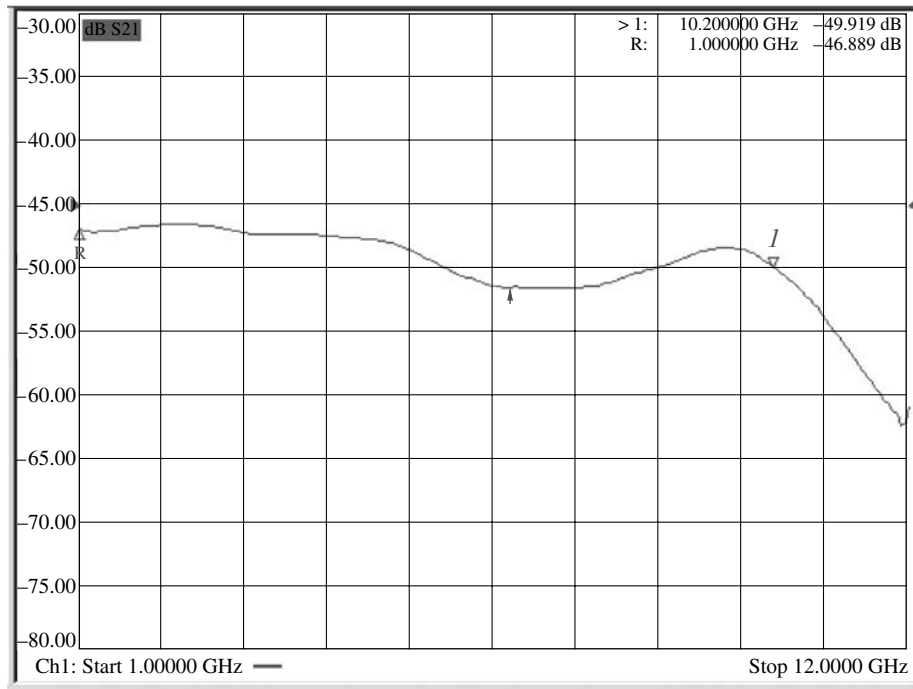


Рис. 8. Измеренная ЧМХ лазера с серповидной активной областью (ток 120 мА, снимок с экрана).

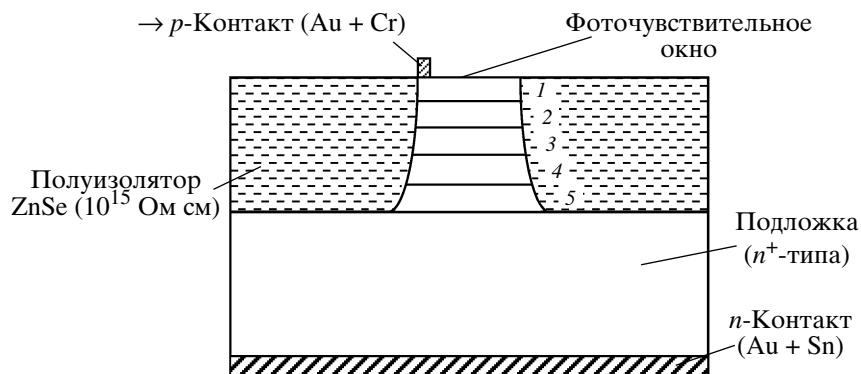


Рис. 9. Общий вид поперечной гетероструктуры *p-i-n*-фотодиода: 1 – контактный слой (*p*⁺-типа; 2 – слой усиления (*p*-типа); 3 – поглощающий слой (*i*-типа); 4 – буферный слой (*n*-типа); 5 – контактный слой (*n*-типа).

Моделирование, анализ и оптимизация параметров данной структуры также проводились в приборно-технологической САПР SYNOPSIS Sentaurus T-CAD. Моделирование осуществляли по следующей методике. Прежде всего проводится оценка эффективности поглощения оптического поля в выбранной гетероструктуре. В случае корректности моделируемой гетероструктуры рассчитывается ее вольт-амперная характеристика, с помощью которой определяется темновой ток фотодиода и напряжение обратного смещения, при котором еще

отсутствует лавинный режим. При соответствии темнового тока целевому показателю и выбранном напряжении смещения рассчитываются семейства амплитудно-частотных характеристик (зависимость токовой чувствительности фотодиода от частоты модуляции оптического сигнала) для различных значений концентрации носителей в поглощающем слое, толщины поглощающего слоя и ширины (для двумерной модели) фоточувствительного окна. По результатам расчета определяются оптимальные структурные параметры и технологи-

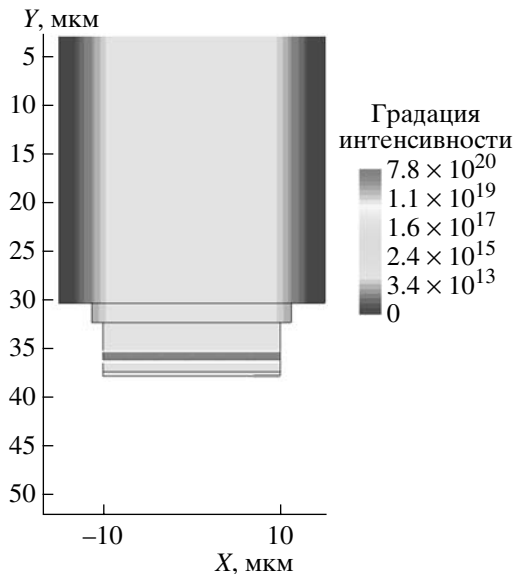


Рис. 10. Распределение интенсивности оптического поля в поперечной гетероструктуре $p-i-n$ -фотодиода (рис. 9).

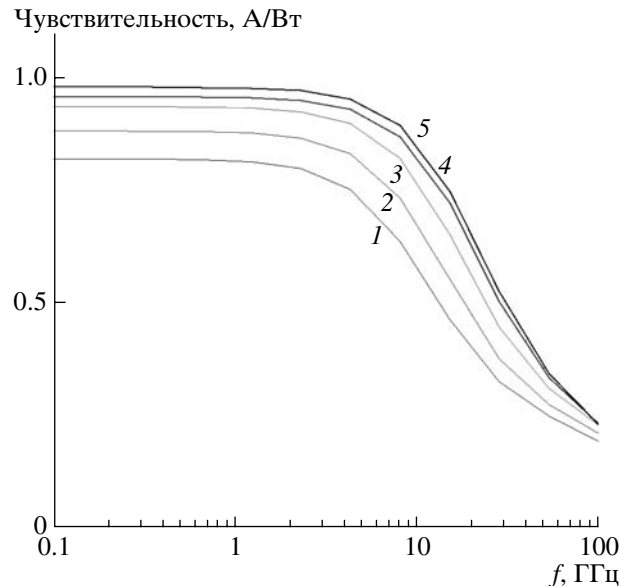


Рис. 11. Частотная зависимость чувствительности фотодиода от толщины поглощающего слоя: $s = 0.3$ (1), 0.55 (2), 0.8 (3), 1 (4), 1.3 мкм (5).

ческие допуски, соответствующие указанным целевым показателям.

Моделирование на постоянном токе. Согласно приведенной методике прежде всего нужно было удостовериться в эффективности поглощения оптического поля в выбранной структуре. Результаты расчета распределения интенсивности оптического поля представлены на рис. 10. Как следует из рисунка, практически все оптическое поле поглощается в слое 3, что свидетельствует о правильности выбора фотодиодной структуры.

Расчет обратной ветви вольт-амперной характеристики исследуемой фотодиодной структуры показал [42], что темновой ток получился существенно ниже 1 нА и, несмотря на наличие в структуре слоя усиления, фотодиод не переходит в лавинный режим. Причем даже при сравнительно больших интенсивностях его дифференциальное сопротивление превышает 100 МОм при обратном напряжении 10 В. Поэтому дальнейшие расчеты проводились при постоянном напряжении 10 В.

Моделирование в СВЧ-диапазоне. Как известно, быстродействие $p-i-n$ -фотодиода ограничивается следующими основными факторами:

- 1) временем пролета фотоносителей в обедненной (поглощающей) области;
- 2) временем заряда/разряда собственной емкости диода;
- 3) временем диффузии медленных носителей (дырок), генерированных вне обедненной области;
- 4) временем заряда ловушек на гетерограницах.

Все четыре фактора учитываются в разработанной программе. Среди них определяющими являются первые два фактора, которые в основном зависят от концентрации примесей (N) и толщины (s) обедненного слоя, а также от диаметра (в данной двумерной модели – ширины (w)) фоточувствительного окна.

Все три переменные независимы, поэтому сначала определяли оптимальную концентрацию примесей. Результаты расчета малосигнальной частотной характеристики фотодиодной структуры в зависимости от концентрации примесей в поглощающем слое при $s = 1$ мкм и $w = 25$ мкм показали [42], что токовая чувствительность фотодиода увеличивается, а полоса пропускания расширяется по мере уменьшения N . Однако концентрации примесей $N \leq 2 \times 10^{16}$ см⁻³ не приводят к существенному расширению полосы, что важно с технологической точки зрения. Например, полоса, равная 30 ГГц (что соответствует целевому показателю) достигается при концентрации примесей в слое поглощения $N = 1 \times 10^{16}$ см⁻³. Данная величина, как известно, может быть реально достигнута даже при жидкофазной эпитаксии, поэтому она использована в дальнейших расчетах.

Результаты расчета малосигнальной частотной характеристики фотодиодной структуры в зависимости от толщины поглощающего слоя s при $N = 1 \times 10^{16}$ см⁻³ и $w = 25$ мкм представлены на рис. 11. Из данного рисунка можно сделать вывод, что в сверхбыстродействующих $p-i-n$ -фотодиодах для расширения полосы пропускания необходимо не уменьшать толщину слоя поглощения (i -слоя) со-

гласно известным результатам, а увеличивать ее, что объясняется необходимостью учета не только времени пролета носителей через обедненную область, но и времени заряда/разряда собственной емкости диода. Другой вывод состоит в том, что для достижения полосы 30 ГГц, соответствующей целевому показателю проекта, толщина должна быть порядка 1 мкм. Дальнейшее увеличение толщины слоя *z* (см. рис. 9) не приводит к существенному расширению полосы пропускания.

Из простых физических соображений следует, что значительное влияние на расширение полосы пропускания фотодиода должно оказывать уменьшение ширины фоточувствительного окна. Для оценки его был произведен расчет малосигнальной частотной характеристики фотодиодной структуры в зависимости от ширины фоточувствительного окна *w* при $N = 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $s = 1 \text{ мкм}$. Результаты расчета представлены на рис. 12.

Из рисунка следует, что полоса пропускания расширяется по мере уменьшения *w*, что соответствует известным данным. В частности, для обеспечения целевой полосы 30 ГГц в структуре рис. 9 ширина фоточувствительного окна должна быть не более 21 мкм. Эксперименты по верификации полученных результатов моделирования в полосе до 30 ГГц пока не проводились. Тем не менее наши теоретические расчеты подтверждаются данными других исследователей и разработчиков. А именно, упомянутый выше измерительный *p-i-n*-фотодиод имеет следующие параметры: полоса пропускания 25 ГГц при диаметре фоточувствительной площадки 25 мкм. Это несколько хуже наших данных (см. рис. 12), что можно объяснить влиянием паразитных элементов (емкости корпуса, индуктивности выводов и т.д.) в реальном фотодиоде. Корректный учет их влияния в СВЧ-диапазоне является темой наших дальнейших модельных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены основные цели и задачи, объекты исследования и важнейшие области применения в современных и перспективных сетях и системах телекоммуникационного и радиолокационного назначений нового направления фотоники: сверхвысокочастотной оптоэлектроники. Проведенный анализ вектора современного мирового развития компонентной базы и устройств этого направления, результаты обзора достижений последних лет, предложенные теоретический подход и пути улучшения основных характеристик современной оптоэлектронной компонентной базы, а также начальные результаты моделирования и экспериментального исследования лазеров и фотодиодов с полосой пропускания в СВЧ-диапазоне, являющихся принципиальными структурными элемен-

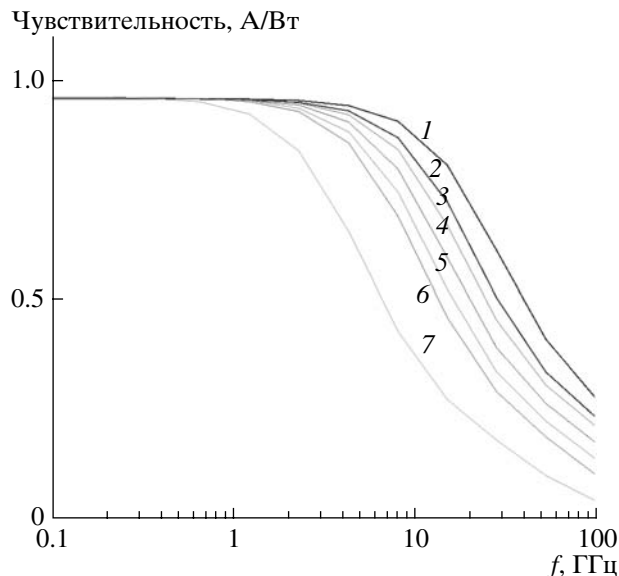


Рис. 12. Частотная зависимость чувствительности фотодиода от ширины фоточувствительного окна $w = 18$ (1), 20 (2), 22 (3), 24 (4), 26 (5), 28 (6), 30 мкм (7).

тами узлов и устройств сверхвысокочастотной оптоэлектроники, свидетельствует об актуальности данного направления для целей ускорения развития экономики и обороноспособности нашей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seeds A.J. // IEEE Trans. 2002. V. MTT-50. № 3. P. 877.
2. Васильев П.П. // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 3. С. 268.
3. Vasil'ev P.P. Ultrafast Diode Lasers: Fundamental and Applications. Norwood: Artech House, 1995.
4. Дураев В.П., Калашиников В.С., Коняев В.П. и др. // Радиотехника. 1988. № 8. С. 46.
5. Евтихиев Н.Н., Лукашин А.В., Морозов М.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 17. С. 1580.
6. Бахрах Л.Д., Блискавицкий А.А. // Квант. электрон. 1988. Т. 15. № 5. С. 879.
7. Голдобин И.С., Курносков В.Д., Плявенек А.Г. и др. // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 2. С. 218.
8. Белкин М.Е. // Труды НИИРадио. 1985. № 4. С. 30.
9. Белкин М.Е. // Радиотехника. 1991. № 2. С. 75.
10. Belkin M.E., Ravich V.N. // ISFOC'92 Conf. Proc. St. Petersburg. 1992. P. 224.
11. Fetisov Y.K., Romanov I.G., Studenov V.P. // Electron. Lett. 1995. V. 31. № 14. P. 1168.
12. Mishina E.D., Sherstuk N.E., Sigov A.S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 12. P. 2402.
13. Fetisov Y.K., Klimov A.A. // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. V. 22. № 1. P. 274.
14. Реутов А.П., Белкин М.Е. // Научные технологии. 2004. Т. 5. № 12. С. 21.
15. Li K., Izutsu M. // IEEE Trans. 2004. V. EIS-24. № 2. P. 250.

16. Huff D.B., Anthes J.P. // IEEE Trans. 1990. V. MTT-38. № 5. P. 571.
17. Juodawlkis P.W., Twichell J.C., Betts G.E. // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 10. P. 1840.
18. Иммореев И.Я. // Труды межд. научн. конф. "Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике". Суздаль. Сент. 2005. С. 3.
19. Seeds A.J., Williams K.J. // IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 2006. V. 24. № 12. P. 4628.
20. Niiho T., Nakaso M., Masuda K. et al. // IEEE Trans. 2006. V. MTT-54. № 2. P. 980.
21. Yao X.S., Maleki L., Elyahu D. // IEEE MTT Symposium Digest. 2004. TU6C-4. P. 287.
22. Wang X., Games N.J., Gomes-Rojas L. et al. // IEEE MTT Symposium Digest. 2000. TH4C-5. P. 1753.
23. Choi C.-S., Kang H.-S., Kim D.-H. et al. // IEEE MTT Symposium Digest. 2004. TU6D-1. P. 401.
24. Hirata A., Harada M., Nagatsuma T. // IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 2003. V. 21. № 10. P. 2145.
25. Белкин М.Е., Мишина Е.Д., Лебедев С.В., Фетисов Ю.К. // Матер. межд. научн.-техн. конф. INTERMATIC-2006 "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". М.: МИРЭА, 2006. Ч. 1. С. 68.
26. Белкин М.Е., Васильев М.Г., Засовин Э.А. // Радиотехника. 2008. № 1. С. 71.
27. Белкин М.Е. Аналоговые волоконно-оптические системы с частотным разделением каналов на ВЧ и СВЧ поднесущих и сети на их основе. Автореф. дис. докт. техн. наук. М.: МИРЭА, 2007. 34 с.
28. Крейнгель Н.С. Шумовые параметры радиоприемных устройств. Л.: Энергия, 1969.
29. Moore N., Lau K.Y. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. № 10. P. 936.
30. Vahala K.J., Newkirk M.A., Chen T.R. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. № 25. P. 2506.
31. Голдобин И.С., Лукьянов В.Н., Плявенек А.Г. и др. // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 7. С. 1370.
32. Gubenko A.E., Gadjiev L.M., Il'inskaya N.D. et al. // Abstr. 19th Intern. Semiconductor Laser Conf. (ISLC). Matsue-shi, Japan. Sept. 2004. P. 51.
33. Pao-Lo L., Williams K.J., Frankel M.Y., Esman R.D. // IEEE Trans. V. MTT-47. № 7. P. 1297.
34. Gustavsson M., Hedekvist P.O., Andrekson P.A. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2005. V. 15. № 5. P. 297.
35. Muramoto Yo., Fukano H., Furuta T.A. // IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 2006. V. 24. № 10. P. 3830.
36. Васильев М.Г., Васильев А.М., Вилк Д.М., Шелякин А.А. // Неорган. материалы. 2007. Т. 43. № 7. С. 775.
37. Yakovlev Yu.P., Andreev I.A., Kizhayev S.S. et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6636. 66360D-(1-13).
38. Белкин М.Е., Васильев М.Г. // Материалы межд. конф. ИНТЕРМАТИК-2007 "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". Ноябрь 2007. М.: МИРЭА, 2007. Т. 3. С. 176.
39. Белкин М.Е., Дзичковский Н.А. // Материалы межд. конф. ИНТЕРМАТИК-2007 "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". Ноябрь 2007. М.: МИРЭА, 2007. Т. 3. С. 170.
40. Belkin M.E. // Abstr. Int. Conf. "Functional Materials" ICFM-2007. Ukrain, Crimea. 2007. EQ-8P/26. P. 346.
41. Белкин М.Е., Васильев М.Г. // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 23.
42. Белкин М.Е., Дзичковский Н.А., Индрищенко В.И. // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 23.