

# Исследование способов перестройки параметрических генераторов света видимого и ИК диапазонов\*

С.А.Андреев, Н.П.Андреева, М.С.Барашков, В.В.Бадиков, В.К.Демкин, А.К.Дон, В.М.Епихин, М.И.Крымский, Ю.К.Калинников, К.В.Митин, А.М.Серегин, В.В.Синайский, М.А.Талалаев, А.А.Чистяков, Н.И.Щебетова, Т.А.Щетинкина

*Экспериментально реализованы и исследованы различные варианты схем параметрических генераторов света (ПГС) на монокристаллах  $AgGaS_2$ ,  $LiNbO_3$ ,  $HgGa_2S_4$  и твердом растворе  $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ , генерирующих излучение в диапазоне 1.2–5.7 мкм, при использовании различных способов перестройки длины волны излучения ПГС, в том числе «быстрой» перестройки (за время менее 0.1 мс) с помощью акустооптического дефлектора. Обужение спектральной ширины линии излучения осуществлялось внутрирезонаторным акустооптическим фильтром. На монокристалле ВВО реализован ПГС видимого диапазона с электродинамической настройкой на произвольную длину волны этого диапазона за время 5 мс.*

**Ключевые слова:** параметрический генератор света, перестройка длины волны, акустооптический дефлектор, акустооптический фильтр, электродинамический привод.

## 1. Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных путей получения высокоэнергетичного перестраиваемого излучения в видимой и ИК областях спектра является нелинейно-оптическое преобразование частоты в параметрических генераторах света (ПГС). Перестраиваемые по частоте ПГС перспективны для решения различных, в том числе и специальных, задач. Примерами спектроскопического применения широкополосных ПГС являются CARS, а также когерентная внутрирезонаторная и некогерентная фемто- и пикосекундная спектроскопии [1, 2]. Узкополосные источники зондирующего излучения необходимы при создании эффективных и универсальных (для широкого набора детектируемых веществ) систем дифференциального поглощения (ДП) [3, 4].

Разработка ПГС ближнего ИК (0.7–2.5 мкм), среднего ИК (2.5–11 мкм) и видимого диапазонов, которая велась во ФГУП «НПО "Астрофизика"» более десяти последних лет, была направлена как на увеличение ско-

рости и диапазона перестройки, так и на продвижение в средний ИК диапазон.

Одним из существенных требований к ПГС при работе в мобильных лидарах ДП является скорость перестройки. В [5] нами была разработана концепция использования двухдиапазонного ИК излучателя на основе ПГС для контроля герметичности продуктопроводов и газохранилищ, оценки потерь углеводородного сырья, выявления уровня взрывоопасности облака утечки. Техническое решение предполагало работу газоанализатора на основе ПГС в двух диапазонах поглощения углеводородов – в области сильного поглощения (вблизи 3.3 мкм) и в области слабого поглощения (вблизи 1.66 мкм). Разрабатывались методы увеличения быстродействия ПГС с использованием электродинамических приводов (время переключения 5 мс), акустооптических дефлекторов (АОД) (время переключения ~0.1 мс), а также акустооптических фильтров (АОФ), осуществляющих перестройку в пределах линии генерации ПГС [6].

Продвижение в ПГС в средний ИК диапазон происходило благодаря развитию технологии выращивания халькогенидных монокристаллов в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета, где, в частности, удалось вырастить кристалл (твердый раствор) тиогаллата кадмия – ртути ( $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ ) хорошего оптического качества с плавно изменяющейся концентрацией кадмия в плоскости синхронизма [7–9].

## 2. ПГС с «быстрой» перестройкой частоты излучения

### 2.1. ПГС на основе монокристалла $LiNbO_3$ с акустооптическим управлением спектром излучения

*Экспериментальная установка.* На рис.1 представлена обобщенная схема эксперимента. Показан ПГС с внутрирезонаторным расположением АОФ, однако в ряде экспериментов фильтр располагался вне резонатора. С

\*Работа посвящается 40-летию ФГУП «НПО "Астрофизика"».

С.А.Андреев, Н.П.Андреева, М.С.Барашков, В.К.Демкин, А.К.Дон, М.И.Крымский, К.В.Митин, А.М.Серегин, В.В.Синайский, М.А.Талалаев, Н.И.Щебетова, Т.А.Щетинкина. ФГУП «НПО "Астрофизика"», Россия, 123424 Москва, Волоколамское ш., 95; e-mail: np\_andreeva@mail.ru, aphysica@aha.ru

В.В.Бадиков. Кубанский государственный университет, Лаборатория новейших технологий, Россия, 350058 Краснодар, ул.Ставропольская, 149; e-mail: ntlab@mail.kubsu.ru

В.М.Епихин, Ю.К.Калинников. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: office@vniitri.ru

А.А.Чистяков. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: chistaa@mail.ru

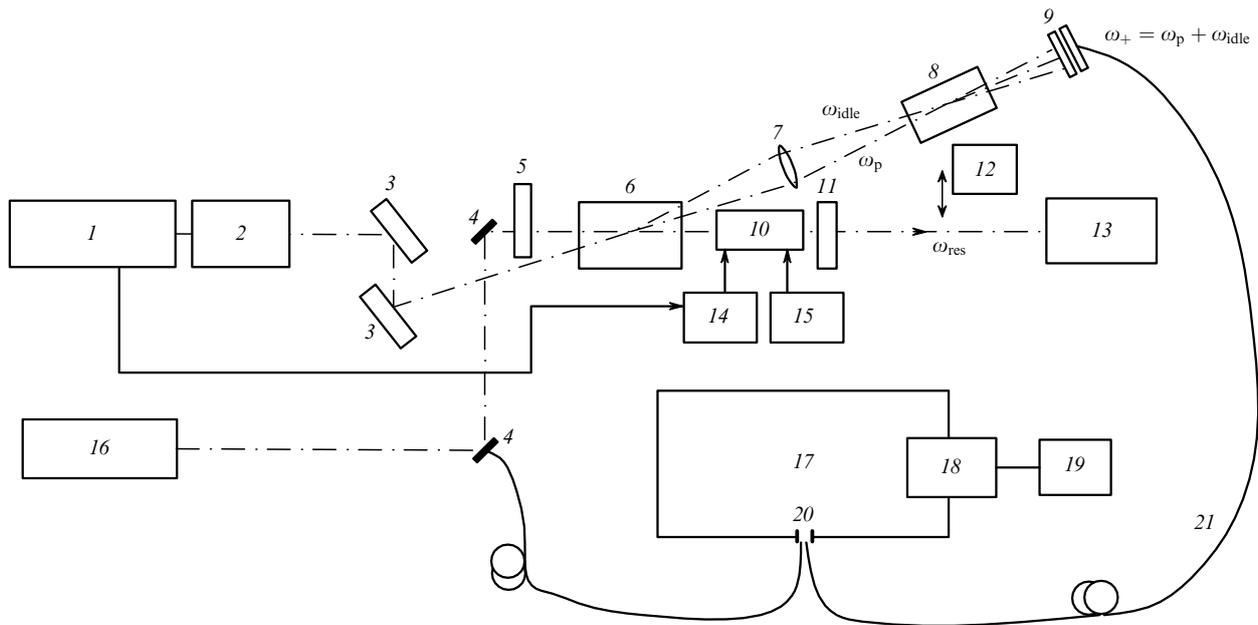


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ПГС с АОД и АОФ:

1 – лазер накачки; 2 – АОД; 3, 4, 5, 11 – зеркала; 6 – нелинейный кристалл  $\text{LiNbO}_3$ ; 7 – линза; 8 – нелинейный кристалл КТА; 9 – фильтры; 10 – узел АОФ; 12 – измеритель энергии; 13 – спектрометр Digikrom CM 112; 14 – генератор Г5-54; 15 – драйвер; 16 – юстировочный лазер; 17 – анализатор спектра; 18 – видеокамера; 19 – видеоконтрольное устройство; 20 – вертикальная щель; 21 – жгут из стекловолокон.

целью защиты зеркал резонатора и внутрирезонаторных селективирующих элементов, например АОФ, от прямого воздействия мощного излучения накачки резонатор ПГС на монокристалле  $\text{LiNbO}_3$  с обратной связью для излучения с наибольшей длиной волны был построен по неколлинеарной схеме (накачка вне зеркал). Лазер накачки 1 имел следующие параметры:  $\lambda = 1.064$  мкм, энергия в импульсе до 1.4 Дж, длительность импульса 9 нс, частота следования 10 Гц, однородный и близкий к прямоугольному профиль распределения интенсивности. Излучение лазера накачки 1, прошедшее АОД 2, поворотными зеркалами 3 направлялось на нелинейный кристалл 6 ( $\text{LiNbO}_3$ ) под углами  $\alpha$ , изменяемыми с помощью АОД 2 в диапазоне  $3.2^\circ - 6.4^\circ$  в воздухе. Резонатор был настроен на длинноволновый диапазон генерируемого излучения с  $R = 99\%$  (зеркало 5) и  $R = 91\%$  (зеркало 11). Узел АОФ 10 помещался как внутрь резонатора – для генерации узкополосного излучения, так и находился вне его – для внerezонаторного измерения естественной ширины полосы генерации ПГС. Для этого схема модифицировалась: АОФ 10 помещался перед спектрометром 13. АОФ управлялся драйвером 15 и синхронизировался с генератором накачки с помощью генератора Г5-54 14, формирующего импульсы требуемой длительности ( $\tau_p = 180$  мкс) с временной задержкой  $\tau_d = 150$  мкс. Мощность выходного излучения измерялась измерителем энергии PE-25BV с регистратором NOVA 12.

Длина волны генерации измерялась спектрометром Digikrom CM 112 13 и визуализировалась генератором суммарной частоты (ГСЧ), в котором осуществлялось преобразование излучения диапазона длин волн 1.5–1.8 мкм в диапазон 0.61–0.65 мкм путем фокусирования с помощью линзы 7 излучений с  $\omega_{idle}$  и  $\omega_p$  в нелинейный кристалл КТА 8 длиной 25 мм, оптическая ось которого была ориентирована относительно нормали ко входной грани под углом  $53^\circ$ . В кристалле происходило суммирование

частот, т. е. нелинейное преобразование ИК излучения в красный диапазон спектра. Излучением видимого диапазона (через жгут из стекловолокон 21) освещалась щель 20 анализатора спектра 17. Регистрация визуализированного излучения осуществлялась видеокамерой 18 (WAT-502A), а видеосигнал с камеры наблюдался на видеоконтрольном устройстве 19 в виде изображения вертикальной щели 20, причем в верхней части экрана присутствовало изображение реперного излучения (0.6328 мкм), а в его центральной части – смещающееся горизонтально изображение исследуемого излучения. Экран монитора по горизонтали был равен 68 мм, измеренная нами дисперсия составляла  $1 \text{ см}^{-1}/\text{мм}$ , что позволяло измерять ширину линии генерируемого излучения с точностью до  $1 \text{ см}^{-1}$ .

*Перестройка частоты излучения ПГС с помощью АОД.* Основные технические характеристики АОД на основе кристалла  $\text{TeO}_2$ , использованного в эксперименте, были следующими: угол сканирования  $\pm 1^\circ$ , коэффициент оптической передачи не менее 90%, время установки заданной длины волны  $\sim 0.1$  мс, степень деполаризации менее 5%, диапазон электронной перестройки частоты 70–90 МГц, частота изменялась с дискретностью 80 (грубо) и 1000 (точно). Управление АОД осуществлялось персональным компьютером со встроенной платой (ЛА-2ЦАП15) и соответствующим программным обеспечением.

Перестройка ПГС с помощью АОД исследовалась при внerezонаторном расположении АОФ. Излучение одномодового лазера накачки 1 на  $\text{YAG}:\text{Nd}$  ( $\lambda_p = 1.064$  мкм) горизонтальной поляризации через ячейку АОД 2 зеркалами 3 заводилось в узел ПГС. Длительность импульса накачки составляла 10 нс, энергия в импульсе – 250 мДж. Сканирование проводилось в диапазоне  $1^\circ$ , что теоретически соответствовало спектральному диапазону перестройки 2.8–3.4 мкм. Узел ПГС был собран по неколлинеарной схеме с минимальным углом неколлинеарно-

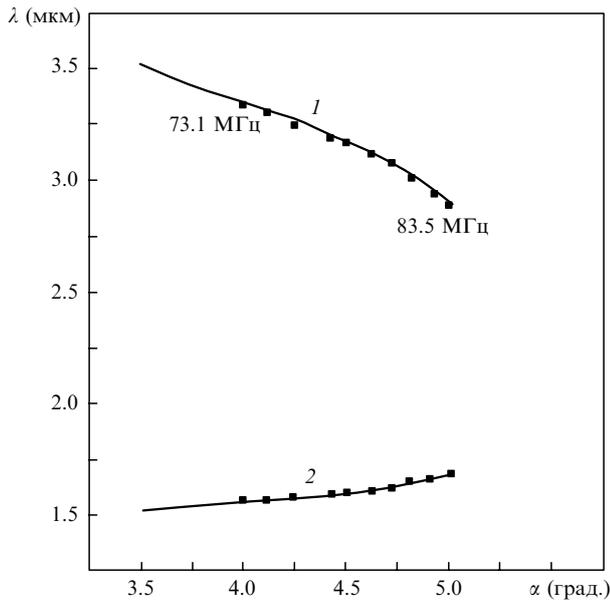


Рис.2. Перестроенные кривые ПГС для резонаторной (1) и холостой (2) волн и экспериментальные точки.

сти  $\alpha = 3.2^\circ$  между осью резонатора и направлением излучения накачки. На рис.2 показаны перестроенные кривые и экспериментальные точки; область изменения звуковой частоты АОД составляла 73.1–83.5 МГц, при этом длины волн генерации ПГС перестраивались в диапазонах 1.56–1.69 мкм и 3.36–2.88 мкм. Кристалл  $\text{LiNbO}_3$  был неподвижен, угол ориентации его оптической оси относительно оси резонатора составлял  $48.5^\circ$ , а угол неколлинеарности  $\alpha$  изменялся от  $4^\circ$  до  $5^\circ$ .

Дальнейшее расширение диапазона угловой спектральной перестройки ограничивалось уходом излучения накачки из области взаимодействия в нелинейном кристалле. Расширение области угловой спектральной перестройки до  $2^\circ$  требует создания специальной оптики для переноса оси качения излучения накачки из центра АОД в центр кристалла ПГС.

*Исследование спектральных характеристик излучения ПГС с АОФ.* На основе схемы квазиколлинеарного акустооптического взаимодействия в кристалле  $\text{TeO}_2$  был спроектирован фильтр с минимально возможной шириной аппаратной функции, которая ограничивалась только размерами и однородностью кристалла [10].

Основные технические характеристики АОФ, использованного в эксперименте, были следующими: диапазон оптической перестройки 2–4 мкм, коэффициент пропускания в диапазоне перестройки не менее 90 %, шаг перестройки  $0.5 \text{ см}^{-1}$ , время установки заданного значения длины волны во всем диапазоне перестройки не более 100 мкс, точность установки заданного значения длины волны  $0.1 \text{ см}^{-1}$ , спектральный дрейф оси пучка на выходе АОФ в пределах угла дифракции, деполяризация менее 1 %, длина акустооптического взаимодействия 45 мм. Управление производилось драйвером от РС IBM через параллельный порт.

Для калибровки рабочего образца АОФ была измерена частота акустической волны, соответствующая фильтрации излучения на  $\lambda = 3.39 \text{ мкм}$ . Источником излучения с длиной волны 3.39 мкм являлся He–Ne-лазер ЛГН 118-3В. Была определена звуковая частота, при которой происходит фильтрация на длине волны 3.39 мкм; она

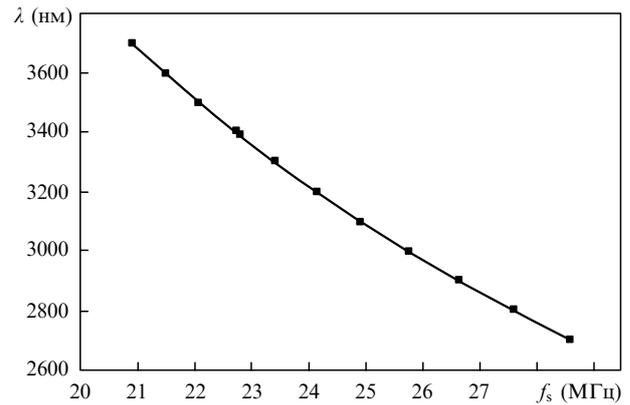


Рис.3. Калибровочная кривая рабочего образца АОФ.

составила 22 780 кГц. Следует отметить, что величина звуковой частоты для фиксированной длины волны зависит от вариантов конструкции АОФ, и в предыдущем варианте образца АОФ она составляла, например, 22641 кГц. На основе измерений экспериментальной зависимости длины волны фильтрации  $\lambda$  от звуковой частоты  $f_s$  была построена калибровочная кривая рабочего образца АОФ (рис.3).

На длине волны 3.39 мкм были измерены также эффективность дифракции  $T$  и ширина аппаратной функции для одного прохода  $\Delta\lambda_{0.5}$ , составившие 95 % и  $1.7 \text{ см}^{-1}$  соответственно. В условиях генерации ПГС ширина аппаратной функции АОФ должна уменьшиться в  $P^{1/2}$  раз, где  $P$  – число проходов излучения в резонаторе.

С помощью разработанного инфракрасного АОФ были прописаны формы линий естественной (необуженной) генерации ПГС, т.е. АОФ служил анализатором спектра. На рис.4 показаны нормированные на максимум интенсивности  $I$  линии генерации ПГС, записанные при различной ориентации оптической оси кристалла  $\text{LiNbO}_3$  в коллинеарном (2402, 2470, 2502 нм) и неколлинеарном (3320 нм) режимах. На рис.5 показана нормированная по интенсивности  $I$  форма линии генерации ПГС на длине волны  $\lambda = 3320 \text{ нм}$ , выраженная в звуковых частотах с помощью АОФ.

В нашей работе [6] впервые сообщалось о получении эффекта обужения линии генерации коллинеарного ПГС с помощью внутррезонаторного АОФ. Измерялась ширина полосы генерации на длине волны 2500 нм. Генери-

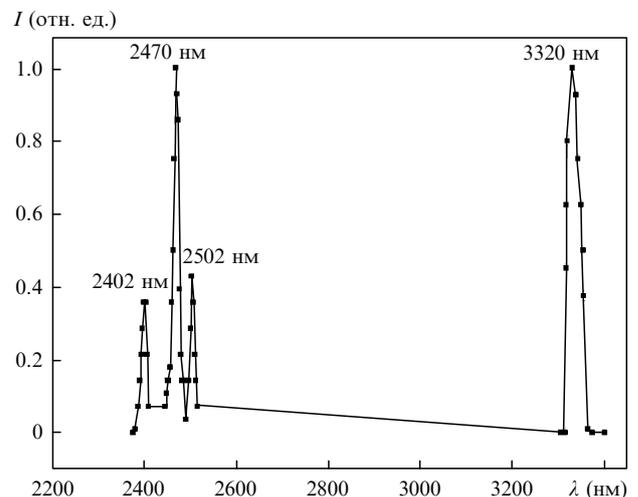


Рис.4. Форма линий генерации ПГС, записанная с помощью АОФ.

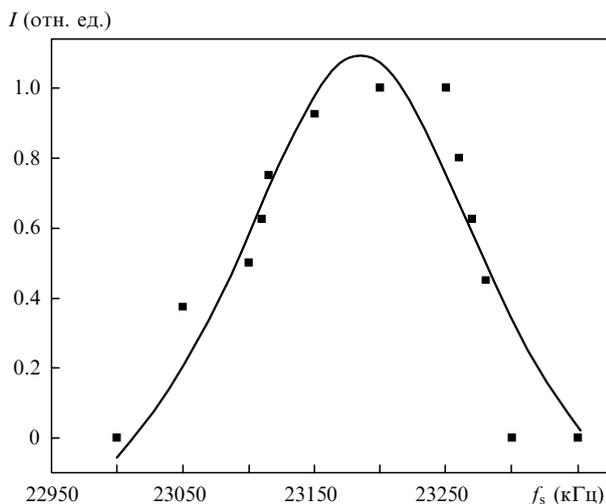


Рис. 5. Форма линии генерации ПГС на длине волны 3320 нм, записанная в звуковых частотах с помощью АОФ (точки); сплошная кривая – аппроксимация лоренцевой функцией.

руемое излучение регистрировалось с помощью системы на основе модернизированного монохроматора МДР-23. Модернизация состояла в расширении рабочей области монохроматора в ИК диапазон и в его автоматической перестройке (двигателем с редуктором) с одновременной регистрацией энергии излучения фотодиодом на основе PbS и запоминанием обработанной информации с помощью ЭВМ. Было зарегистрировано уменьшение ширины линии генерации с  $20 \text{ см}^{-1}$  до  $5 \text{ см}^{-1}$  – величины, ограниченной разрешением использованного спектрального прибора.

В эксперименте, проводимом в настоящей работе, для неколлинеарного ПГС, генерирующего на длине волны 3340 нм ( $3010 \text{ см}^{-1}$ ), на экране видеоконтрольного устройства 19 (см. рис. 1) было зарегистрировано обужение линии генерации более чем в 10 раз при помещении АОФ в резонатор ПГС и проведена оценка ее ширины. Измеренная естественная ширина линии генерации визуализированного излучения с  $\lambda = 633 \text{ нм}$  составляла  $\sim 40 \text{ см}^{-1}$ , обуженная с помощью внутррезонаторного АОФ – около  $3 \text{ см}^{-1}$ . При этом следует учесть, что в данном эксперименте визуализировалось излучение на более короткой длине волны генерации (1561 нм), спектральная ширина которого, в отличие от излучения на  $\lambda = 3340 \text{ нм}$ , увеличивается за счет расходимости накачки (по нашим расчетам примерно на  $1.5 \text{ см}^{-1}$ ). Кроме того, при визуализации свой вклад в ширину линии суммарной частоты (видимого диапазона) вносит ширина линии накачки ( $1 \text{ см}^{-1}$ ). Исходя из полученных экспериментальных результатов, ширина линии резонаторной волны 3340 нм равна  $0.5\text{--}0.8 \text{ см}^{-1}$ , что хорошо совпадает с расчетной шириной аппаратной функции АОФ в нашей схеме ( $0.6 \text{ см}^{-1}$ ). В перспективе планируется проведение экспериментов по прямому измерению ширины резонаторной линии ПГС с внутррезонаторным АОФ.

## 2.2. ПГС на основе монокристалла ВВО с электродинамической перестройкой частоты излучения

Скорость перестройки длины волны ПГС поворотом нелинейного кристалла в резонаторе определяется, в основном, скоростью изменения углового положения кристалла и крутизной его перестроечной характеристики. В

известных схемах коммерческих лазеров на ВВО перестройка частоты осуществляется последовательно, с помощью микрометрической подачи и механического узла, или, для увеличения скорости, вращением микрометрического винта с помощью шагового двигателя, управляемого ЭВМ.

В настоящей работе дальнейшее увеличение скорости перестройки достигнуто применением быстродействующих электродинамических приводов (ЭДП). При управлении с их помощью нелинейные кристаллы располагались в своих оправах непосредственно на осях электродинамических (исполнительных) механизмов ЭДП, что обеспечивало высокую скорость изменения углового положения кристаллов и, как следствие, высокую скорость перестройки длины волны излучения.

Был разработан и исследован быстроперестраиваемый ПГС видимого и ближнего ИК диапазона ( $0.47\text{--}1.5 \text{ мкм}$ ). Использовалась хорошо известная коллинеарная схема ПГС на двух идентичных (вырезанных из одной булы) нелинейных кристаллах ВВО, ориентированных таким образом, чтобы скомпенсировать «снос» энергии накачки и тем самым существенно увеличить длину взаимодействия и, следовательно, эффективность ПГС. Для каждого из кристаллов ВВО с помощью идентичных однокоординатных ЭДП осуществлялась «быстрая» перестройка длины волны излучения в области  $0.47\text{--}1.5 \text{ мкм}$ .

Технические характеристики разработанных ЭДП: габариты нагрузки (кристалл ВВО)  $12 \times 12 \times 14 \text{ мм}$ , масса нагрузки 50 г, диапазон углов поворота кристалла  $\pm 2.5^\circ$ ; при подаче управляющего сигнала в виде меандра (в автономном режиме) время нарастания переходного процесса составило 2 мс, время установления (соответствующее времени перестройки длины волны) – 5 мс. Расположение угловых положений двух ЭДП при перестройке во всем спектральном диапазоне не превышало величины, соответствующей ширине полосы генерируемого излучения. Кроме того, разработанная программа управления ЭДП позволяла устанавливать произвольную последовательность генерируемых длин волн, что важно при использовании ПГС в лидарах ДП.

## 3. ПГС на халькогенидных кристаллах и новый тип перестройки в ПГС на твердых растворах

*ПГС на основе монокристалла  $\text{AgGaS}_2$ .* ПГС среднего ИК диапазона разрабатывался для решения задач обнаружения метана и других легких углеводородов методом ДП [5]. Общей особенностью этих веществ является наличие молекулярных C–H-групп в химическом строении и характерных линий поглощения в среднем ( $3\text{--}5 \text{ мкм}$ ) ИК диапазоне.

В настоящей работе исследовалась перестройка частоты в наносекундном ПГС на основе кристалла тиогаллата серебра ( $\text{AgGaS}_2$ ), который обладает высокой нелинейностью ( $d_{36} = 22 \text{ пм/В}$ ), низким поглощением в области  $3.0\text{--}5.0 \text{ мкм}$  ( $\alpha \leq 0.07 \text{ см}^{-1}$ ), негигроскопичностью, температурной стабильностью. В эксперименте угол падения накачки на входное зеркало резонатора варьировался вращением резонатора ПГС как целого (в дальнейшем предполагается использовать быстродействующий АОД для изменения угла падения накачки при неподвижном резонаторе, что было реализовано в вышеописанном ПГС на  $\text{LiNbO}_3$ ).

ПГС был создан по однорезонаторной схеме на кристалле  $\text{AgGaS}_2$  длиной 18 мм с апертурой  $10 \times 10$  мм и накачивался излучением Nd:YAG-лазера с длиной волны 1.064 мкм и частотой следования импульсов 12.5 Гц. Система диафрагм позволяла выделить в излучении накачки одну поперечную моду. Резонатор был реализован на «короткой» длине волны параметрической пары и состоял из двух плоских зеркал с  $R = 91\%$  в диапазоне 1.5–1.8 мкм. В эксперименте при изменении угла между направлением излучения накачки и осью резонатора в пределах  $3.5^\circ$  в воздухе длина волны излучения варьировалась от 3.0 до 3.6 мкм. При этом угол наклона оптической оси кристалла к оси резонатора был равен  $51^\circ$ .

*ПГС на основе монокристалла  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$ .* Основные результаты ряда экспериментальных исследований ПГС на кристалле тиогаллата ртути с накачкой импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером, опубликованы в [8, 9].

В работе [9] использовался кристалл  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$ , выращенный по методу Бриджмена–Стокбаргера в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета. Образец имел длину 10.1 мм, высоту 13.8 мм и ширину 13.3 мм и был вырезан под углом  $\theta = 52.7^\circ$  к оси кристалла, ориентированного под I тип синхронизма. На рабочие грани кристалла было нанесено диэлектрическое покрытие с коэффициентом отражения менее 2% для излучения накачки с длиной волны  $\lambda = 1.064$  мкм и менее 0.5% для излучения с  $\lambda = 1.2 - 1.4$  мкм (сигнальная волна).

В качестве источника накачки использовался серийный Nd:YAG-лазер с гауссовым профилем коэффициента отражения зеркал резонатора (модель Brio, Quantel). Лазер работал на длине волны 1.064 мкм в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 20 Гц; энергия в импульсе составляла 100 мДж при стабильности  $\pm 2\%$ . Длительность импульса по уровню 0.5 была равна 4.5 нс, расходимость излучения не превышала 0.3 мрад. Чтобы предотвратить оптическое повреждение кристалла, в схему был введен телескоп с двукратным увеличением, увеличивающий диаметр пучка накачки до 6 мм (по уровню  $1/e^2$ ).

Экспериментально достигнутый диапазон перестройки длины волны холостого излучения составил 3.69–5.69 мкм. При этом внешний угол поворота кристалла был равен  $20^\circ$ . Спектральная ширина диапазона перестройки определялась коэффициентом отражения зеркал и размерами кристалла.

В [9] представлены зависимость средней мощности ПГС от длины волны (максимальное значение было получено для  $\lambda = 4.03$  мкм при нормальном падении излучения накачки на кристалл) и зависимость средней (за серию) энергии импульсов ПГС от средней энергии импульсов накачки (максимальная средняя за серию выходная энергия ПГС достигала 3.3 мДж). Эффективность преобразования по энергии при этом составила 4.7%, дифференциальная эффективность преобразования – 4.9%.

Длительность импульса излучения ПГС на длине волны 4.03 мкм оказалась практически равной длительности импульса накачки и составила  $\sim 3$  нс по уровню 0.5. Задержка импульса генерации ПГС относительно накачки была равна 1 нс.

Распределение интенсивности выходного излучения ПГС по сечению пучка на длине волны 4.03 мкм регистрировалось ИК камерой Ругосам III. Расходимость излучения по оценке составила  $\sim 10$  мрад.

*ПГС на основе твердых растворов состава  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ .* Добавка кадмия в кристаллы  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$  позволяет создавать твердые растворы тиогаллата кадмия–ртути состава  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ , обладающие рядом преимуществ.

Во-первых, введение кадмия в различных концентрациях приводит к изменениям двулучепреломления и главных значений показателей преломления в кристаллах. В результате изменение величины  $x$  позволяет «управлять» условиями фазового синхронизма. В частности, при определенных концентрациях кадмия в кристалле возможна реализация условий не критичного углового фазового синхронизма.

Во-вторых, в процессе роста кристалла возникает естественный градиент концентрации кадмия по длине були. Это обстоятельство позволяет изготавливать элементы для нелинейно-оптических преобразователей с плавным изменением  $x$  в плоскости синхронизма. Используя такие элементы, можно осуществлять перестройку длины волны ПГС путем линейного перемещения кристалла относительно пучка накачки (или перемещения пучка накачки относительно кристалла). При этом условия не критичного фазового синхронизма не нарушаются.

Благодаря развитию технологии выращивания монокристаллов в Лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета по методу Бриджмена–Стокбаргера, удалось вырастить кристалл  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$  хорошего оптического качества с плавно изменяющейся концентрацией кадмия в плоскости синхронизма [7]. Из него был вырезан элемент длиной 11 мм с поперечным сечением  $30.6 \times 8$  мм, ориентированный для реализации не критичного фазового синхронизма I типа ( $e-\infty$ ) ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ). Наблюдалось незначительное изменение цвета от одной грани до другой вдоль оптической оси кристалла. На оптические поверхности элемента были нанесены просветляющие покрытия. Коэффициент отражения от каждой поверхности составлял 0.2%–0.8% в спектральном диапазоне 1–2 мкм.

В качестве источника накачки ПГС использовался Nd:YAG-лазер с кольцевым полуконфокальным резонатором, обеспечивающим генерацию в режиме бегущей волны. Генерация осуществлялась при модуляции добротности. Диафрагма диаметром 1.7 мм, расположенная внутри кольцевого резонатора, обеспечивала генерацию на основной пространственной моде  $\text{TEM}_{00}$ . Длительность импульса излучения составляла 22 нс по уровню 0.5, максимальная энергия в одиночном импульсе достигала 12 мДж. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц.

Резонатор ПГС был образован двумя плоскими зеркалами с диэлектрическими покрытиями. Входное зеркало ПГС с просветляющим покрытием для излучения накачки на передней поверхности изготавливалось из кварцевого стекла КВ, выходное – из фтористого кальция. Коэффициент отражения входного и выходного зеркал составлял 95%–99% в диапазоне 1.4–1.9 мкм. Таким образом, для сигнальной волны резонатор имел максимальную добротность, а холостая волна выводилась из резонатора с минимальными потерями (коэффициент пропускания выходного зеркала 80%–90%). Коэффициент отражения входного зеркала для излучения накачки составлял 10%, выходного – 30%. Расстояние между зеркалами резонатора ПГС было равно 3 см. ПГС располагался в перетяжке пучка накачки, формируемой фокусирующим зеркалом ( $F = 2$  м). Диаметр перетяжки

пучка по уровню  $1/e^2$  в области взаимодействия с кристаллом составил 2 мм. Перестройка длины волны осуществлялась линейным перемещением кристалла относительно пучка накачки в направлении, параллельном его оси.

Для измерения энергии импульса накачки и распределения интенсивности по сечению пучка часть излучения отводилась при помощи оптического клина и регистрировалась измерителем энергии PE-10-BB (Ophir) и камерой C4915 (Cohu). Выходная энергия ПГС измерялась измерителем энергии PE-10-BB, холостая волна выделялась набором фильтров из фтористого кальция с диэлектрическим покрытием (коэффициент пропускания для излучения накачки менее 1 %) и пластиной из германия. Для измерения длины волны использовался монохроматор Digikrom CM112. Регистрация сигнала, прошедшего через монохроматор, осуществлялась при помощи пироэлектрического приемного устройства МГ-30 и осциллографа TDS-1012. Фокусировка излучения ПГС производилась линзой из фтористого бария с фокусным расстоянием 60 мм. Точность измерения длин волн составляла 0.01 мкм. Для контроля пространственного распределения интенсивности излучения по сечению пучка как холостой, так и сигнальной волны использовалась камера Ругосам-III (Spiricon).

В работе измерялись следующие параметры: выходная энергия ПГС  $E_{idle}$  на частоте холостой волны, энергия излучения накачки  $E_p$  и длина волны холостого излучения  $\lambda_{idle}$ . На основании измерений  $E_p$  и  $E_{idle}$  определялась эффективность преобразования по энергии  $\eta = E_{idle}/E_p$ . По тангенсу угла наклона аппроксимирующей зависимости  $E_{idle}(E_p)$  находилась дифференциальная эффективность преобразования  $\eta_{slope}$ .

Нами впервые была получена параметрическая генерация на кристалле тиагаллата кадмия – ртути. Диапазон плавной перестройки длины волны составил 2.85–3.27 мкм. Пороговая энергия излучения накачки при разных положениях кристалла была равна 2.5–4 мДж. Зависимость выходной энергии ПГС на частоте холостой волны от энергии накачки представлена на рис.6. Максимальная эффективность преобразования по энергии для холостой волны ( $\lambda_i = 3.03$  мкм) составила 4.5 %, дифференциальная эффективность преобразования равнялась 6.6 %.

На рис.7 показаны зависимости измеренного коэффициента преобразования по энергии и дифференциального коэффициента преобразования от положения пучка накачки. При  $z = 0 - 25$  мм они изменяются в сравнительно небольших пределах, что говорит об однородности рас-

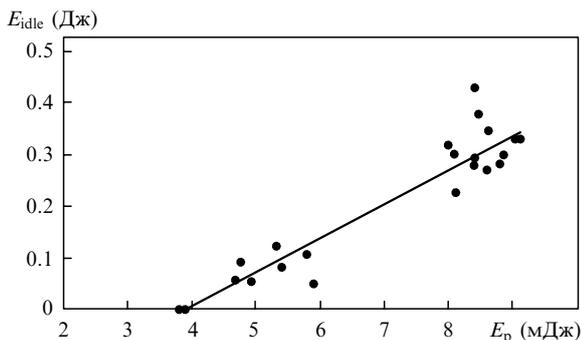


Рис.6. Зависимость выходной энергии ПГС на частоте холостой волны от энергии излучения накачки ( $z = 11$  мм).

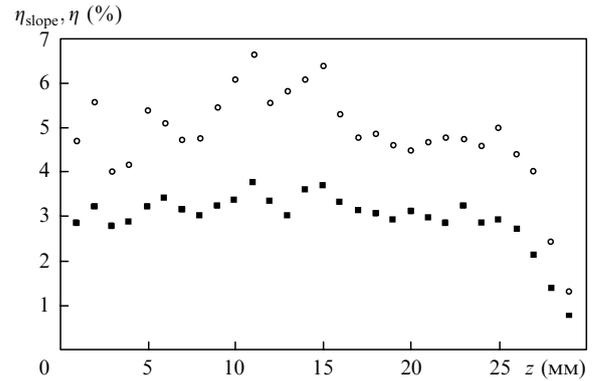


Рис.7. Зависимость максимальной (■) и дифференциальной (○) эффективностей преобразования по энергии от смещения пучка накачки относительно боковой поверхности кристалла (в плоскости синхронизма).

пределения кадмия вдоль оси кристалла. Заметное уменьшение эффективности преобразования наблюдается в краевой области кристалла ( $\sim 3$  мм). По-видимому, это обусловлено значительными искажениями фазового состава в данной области.

Были измерены пространственные распределения интенсивности излучения по сечению пучка холостой волны в ближней и дальней зонах (рис.8). Из анализа этих распределений можно судить об оптическом качестве кристалла. В целом полученные распределения излучения ПГС показывают, что, по крайней мере, в объеме взаимодействия волн неоднородности распределения показателя преломления в кристалле незначительны. Вытянутая форма обусловлена, видимо, «расплыванием» излучения в плоскости синхронизма. Расходимость излучения холостой волны ПГС составила  $\sim 2 \times 10^{-2}$  рад по уровню  $1/e^2$ .

На рис.9 представлена экспериментально полученная зависимость длины волны холостого излучения от положения пучка накачки в кристалле. При смещении пучка в плоскости синхронизма кристалла на 28 мм изменение длины волны равно 0.42 мкм.

Для установления связи между химическим составом кристалла  $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$  и его оптическими свойствами были проведены измерения дисперсии показателей преломления. Для измерений были изготовлены призмы с  $x = 0.27$  и  $0.33$ , преломляющим углом  $\sim 20^\circ$  и размером рабочих граней  $10 \times 10$  мм. Измерения показателей преломления проводились в спектральном диапазоне 0.55–10 мкм автоколлимационным методом на установке, описанной в [11]. Для аппроксимации полученных значений показателя преломления использовалось уравнение Селлмейера [12, 13]:

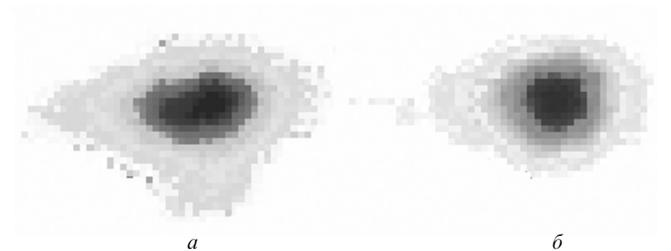


Рис.8. Распределения интенсивности по сечению пучка на выходе ПГС на частоте холостой волны ( $\lambda_{idle} = 3.03$  мкм) для  $z = 11$  мм в ближней (расстояние от выходного зеркала ПГС 160 мм) (а) и дальней (в фокусе линзы с фокусным расстоянием 100 мм) зонах.

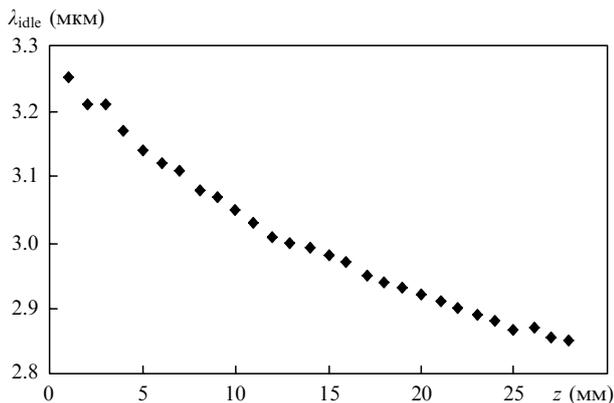


Рис.9. Зависимость длины волны холостого излучения на выходе ПГС от смещения пучка накачки относительно боковой поверхности кристалла.

$$n^2 = A_1 + \frac{A_3}{A_2 - \lambda^2} + \frac{A_5}{A_4 - \lambda^2}, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения в микрометрах. Чтобы определить коэффициенты Селлмейера  $A_{1-5}$  для других концентраций кадмия, использовались показатели преломления, найденные путем интерполяции по  $x$  зависимостей  $n_o(\lambda)$  и  $n_e(\lambda)$  для  $x = 0.27$  и  $0.33$ , а также аналогичных зависимостей, измеренных в работах [13, 14]. Найденные таким образом коэффициенты Селлмейера для кристаллов с разной концентрацией кадмия представлены в табл.1.

Максимальное отклонение значений показателя преломления, полученных из аппроксимации, от экспериментальных данных составляет  $3 \times 10^{-3}$ .

С использованием полученных уравнений Селлмейера и рассчитанных на их основе длин волн для условий 90-градусного синхронизма были определены концентрации кадмия в кристалле. Для точек  $z = 0$  и  $28$  мм концентрация кадмия  $x$  составила  $0.25$  и  $0.21$  соответственно. На рис.10 представлена зависимость концентрации кадмия от смещения пучка накачки в плоскости синхронизма, полученная с использованием экспериментальных данных по измерению длины холостой волны. Из анализа зависимости рис.10 видно, что изменение концентрации кадмия по длине элемента происходит плав-

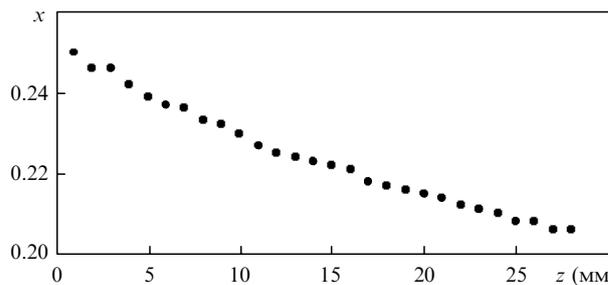


Рис.10. Зависимость расчетного значения концентрации кадмия в кристалле от расстояния от боковой поверхности кристалла.

но, причем зависимость близка к линейной. Это дополнительно характеризует хорошее оптическое качество кристалла.

#### 4. Заключение

При исследовании способов перестройки ПГС видимого и ИК диапазонов были достигнуты следующие результаты.

В эксперименте с использованием акустооптического дефлектора на базе парателлурита область изменения звуковой частоты АОД составила  $73.1 - 83.5$  МГц, при этом длины волн генерации ПГС перестраивались в диапазонах  $1.56 - 1.69$  мкм и  $3.36 - 2.88$  мкм. Время установки заданной длины волны составляло  $\sim 0.1$  мс. Сканирование проводилось в диапазоне  $1^\circ$ , расширение области угловой спектральной перестройки до  $2^\circ$  требует создания специальной оптики переноса оси качания излучения накачки из центра АОД в центр кристалла ПГС.

Исследовались схемы с акустооптическим фильтром на базе парателлурита. При помещении АОФ внутрь резонатора ПГС наблюдалось обужение спектральной ширины линии генерации ПГС более чем в 10 раз. Проведенные эксперименты показали возможность применения в ПГС среднего ИК диапазона акустооптического фильтра как для обужения его полосы генерации (при внутррезонаторном расположении АОФ), так и в качестве анализатора спектра генерации ПГС (при внерезонаторном расположении АОФ). Используемые в экс-

Табл.1. Коэффициенты Селлмейера для твердых растворов  $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ .

$x$	$n$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
0.20	$n_o$	7.17117	639.04	-914.648	0.0979835	-0.220006
	$n_e$	7.03365	653.431	-943.36	0.0770492	-0.210144
0.25	$n_o$	7.42819	749.29	-1295.98	0.0880175	-0.219608
	$n_e$	7.3628	783.563	-1411.87	0.0801083	-0.207095
0.30	$n_o$	7.62356	836.474	-1642.64	0.0717384	-0.220695
	$n_e$	7.41107	805.268	-1512.04	0.0714881	-0.207339
0.35	$n_o$	8.47402	1167.86	-3327.19	0.0635593	-0.2180798
	$n_e$	8.40374	1171.46	-3389.17	0.0807452	-0.2007114
0.40	$n_o$	8.47346	1184.47	-3414.44	0.0406186	-0.220462
	$n_e$	8.33498	1143.19	-3255.20	0.0705351	-0.20029
0.45	$n_o$	8.50139	1213.14	-3569.69	0.0180232	-0.221991
	$n_e$	8.45613	1182.89	-3536.20	0.0653473	-0.197853
0.50	$n_o$	8.47455	1222.13	-3599.99	-0.00379508	-0.222829
	$n_e$	8.42368	1168.94	-3479.53	0.0602277	-0.19524

периментах АОД и АОФ для диапазона 2–4 мкм были изготовлены во ВНИИФТРИ.

Разработан и исследован ПГС видимого диапазона на кристалле ВВО с перестройкой длины волны излучения, осуществляемой двумя следящими приводами на основе электродинамических исполнительных механизмов. Измеренное время перестройки длины волны излучения в диапазоне 0.47–1.5 мкм составило 5 мс. Последовательность генерируемых длин волн может быть установлена по произвольному закону,

Созданы ПГС на халькогенидных кристаллах (тиогаллаты серебра и ртути) с накачкой излучением Nd:YAG-лазера с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 3.0–5.7 мкм.

Разработана технология и выращен новый нелинейно-оптический кристалл, тиогаллат кадмия–ртути ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ ), обладающий хорошим оптическим качеством и равномерным распределением примеси Cd вдоль его оптической оси. В результате на основе этого кристалла удалось создать ПГС с накачкой излучением Nd:YAG-лазера в режиме не критичного фазового синхронизма и принципиально новым способом плавной перестройки длины волны в среднем ИК диапазоне – путем изменения параметра концентрации  $x$ . Диапазон перестройки составил 2.85–3.27 мкм с максимальной дифференциальной эффективностью преобразования 6.6%. Диапазон непрерывной перестройки длины волны ПГС ограничивался только концентрацией кадмия. Изменяя параметр  $x$  от 0.14 до 0.56, можно получить перестраиваемую генера-

цию ПГС в условиях не критичного фазового синхронизма в спектральном диапазоне 2.7–9 мкм.

1. Бабин А.А., Каров А.В. и др. *ИТЭ*, **3**, 160, (1989).
2. Ewbank M.D., Rosker M.J., Bennett G.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 666 (1997).
3. Egret G., Fix A., Weiss V., Poberaj G., Baumert T. *Appl. Phys. B*, **67**, 427 (1998).
4. Sjöholm M., Weibring P., Edner H., Svanberg S. *Opt. Express*, **12** (4), 554 (2004).
5. Андреева Н.П., Барашков М.С., Демкин В.К., Пшеничников С.М. В сб.: *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России* (М.: изд-во ВИМИ, 1996, № 3. с. 87).
6. Андреев С.А., Андреева Н.П., Барашков М.С., Демкин В.К. и др. В сб.: *Акустооптические, акустические и рентгено-спектральные методы и средства измерений в науке и технике* (М.: изд-во ВНИИФТРИ, 2005, вып. 48 (140), с. 35).
7. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серёгин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И. *Квантовая электроника*, **35**, 853 (2005).
8. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серёгин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И. *Квантовая электроника*, **33**, 831 (2003).
9. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серёгин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И., Щетинкина Т.А. *Квантовая электроника*, **37**, 363 (2007).
10. Chang I.C. *Electron. Lett.*, **28**, 1255 (1992).
11. Badikov V.V. et al. *Opt. Mater.*, **23**, 575 (2003).
12. Бадиков В.В., Кузьмин Н.В., Лаптев В.Б. и др., *Квантовая электроника*, **34**, 451 (2004).
13. Бадиков В.В., Матвеев И.Н., Панютин В.Л. и др. *Квантовая электроника*, **6**, 1807 (1979).
14. Бадиков В.В., Матвеев И.Н., Пшеничников С.М., Рычик О.В., Троценко Н.К., Устинов Н.Д. А.с. № 974810. Заявка № 3214481. Приоритет от 4.12.1980.