

## ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.К. Киселев, С.В. Мизрахи, В.П. Радионов

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
61085 Украина, г. Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12,  
тел.: 380-57-720-33-35,  
E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua

УДК 621.373.826:61

*Изложены конструкция и возможности разработанных авторами терагерцевых лазерных установок на основе газоразрядных HCN и DCN лазеров с длиной волны излучения 337, 190 и 195 мкм, предназначенных для биомедицинских исследований. Рассмотрены системы высокочастотной и низкочастотной накачки лазеров, способов контроля длины волны и плавного изменения коэффициента пропускания выводного зеркала резонатора. Описано дополнительное квазиоптическое оборудование для лазерных установок, в частности, программируемый модулятор, позволяющий преобразовывать непрерывное лазерное излучение в импульсное с управляемым и точно контролируемым изменением частоты следования импульсов, система автоматической стабилизации мощности и др.*

**Ключевые слова:** газоразрядный терагерцевый лазер, квазиоптика, амплитудная модуляция, биомедицинские исследования.

### Введение

Терагерцевые HCN лазеры, разработанные в Институте радиофизики и электроники Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ), успешно применяются в биомедицинских исследованиях, подтвердивших биологическую эффективность терагерцевого лазерного излучения [4, 10].

Терагерцевые газоразрядные лазеры пока еще являются громоздкими, дорогостоящими и сложными в обслуживании установками. Для более широкого внедрения таких лазеров в медицинскую практику проводится дальнейшее совершенствование их потребительских качеств – повышение надежности, снижение стоимости и расширение функциональных возможностей лазерных установок, принимаются меры по повышению удобства работы с ними. С этой целью в ИРЭ НАНУ разработаны и испытаны лабораторные терагерцевые лазерные

установки, оптимизированные для проведения биомедицинских исследований с пациентами, лабораторными животными, биологическими культурами и медицинскими препаратами. Ниже описаны особенности их конструкции и возможности, которые эти установки предоставляют исследователю.

Лазерная установка является комплексом, состоящим из ряда систем. Главные из них - лазерный излучатель, система прокачки активного вещества, система накачки, квазиоптический тракт и система контроля лазерного излучения.

### Лазерный излучатель

Основу лазерной установки составляет газоразрядный лазерный излучатель (рис. 1), смонтированный в универсальном корпусе.



Рис. 1. Лазерный излучатель

В корпусе установлены лазерный резонатор и газоразрядная трубка. Лазерный резонатор длиной 1,2 м образован двумя зеркалами, закрепленными в юстировочных узлах. В терагерцевых лазерах применяются металлические зеркала, а для вывода излучения из резонатора – металлические зеркала с отверстиями и проволочные решетки. Юстировочные узлы установлены на инваровых стержнях с системой термостабилизации.

Поскольку в терагерцевых лазерах расстояние между продольными модами резонатора больше, чем естественная ширина лазерной линии, генерация возможна только при определенных дискретных длинах лазерного резонатора. Поэтому, кроме юстировки зеркал, требуется также точная настройка расстояния между ними. Для этого одно из зеркал снабжено специальным микрометрическим механизмом перемещения вдоль оси резонатора с точностью отсчета 1 мкм и диапазоном перемещения более 1 мм. Это дает возможность измерять длину волны излучения с точностью около 0,2 мкм (по расстоянию между десятью полуволнами). Усовершенствованный механизм перемещения (рис. 2) позволяет производить более прецизионную перестройку относительно центра линии (по суммарному набегу волны вдоль резонатора) [6].



**Рис. 2.** Усовершенствованный механизм перемещения зеркала резонатора, установленный на юстировочном узле лазера

В процессе работы лазера расстояние между отражателями резонатора должно поддерживаться постоянным с высокой точностью. Для достижения хорошей стабильности выходной мощности излучения резонатор лазера при длине порядка 1 м

должен быть стабилизирован по расстоянию между отражателями в пределах нескольких микрометров. При работе лазера происходят температурные изменения, требующие подстройки длины резонатора. Для упрощения этой операции в биомедицинских лазерах разработана система дистанционной подстройки резонатора и контроля мощности излучения, позволяющая производить эти операции, не подходя к лазерному излучателю.

Операцию подстройки можно автоматизировать, применив разработанную в ИРЭ НАНУ систему автоматической стабилизации уровня выходной мощности, включающую в себя микроконтроллер и шаговый двигатель, связанный с механизмом перемещения одного из зеркал лазерного резонатора [3]. На микроконтроллер подается сигнал обратной связи, формируемый датчиком контроля лазерного излучения. Система стабилизации либо обеспечивает работу лазера на максимальном уровне мощности излучения, либо стабилизирует последнюю на заданном уровне.

Кроме подстройки резонатора, для перестройки лазера на другую линию излучения, может потребоваться изменение коэффициента пропускания выводного зеркала. Обычно эта операция осуществляется путем смены зеркал, что требует частичной разборки лазера. Для изменения коэффициента пропускания без смены зеркал могут применяться специальные схемы резонаторов. Если в качестве выводного зеркала используется проволочная решетка, то плавно регулировать коэффициент пропускания в широких пределах можно, применив в качестве второго зеркала двугранный 90-градусный отражатель, поворачивающийся вокруг оси резонатора [1]. Если в резонаторе используется металлическое зеркало с выводным отверстием, смещенным относительно центральной оси резонатора, то с помощью поворота двугранного зеркала можно плавно изменять вывод мощности излучения примерно на 50% [8].

#### **Система прокачки активного вещества**

В корпусе газоразрядного лазерного излучателя установлены механизмы подачи и регулировки смеси рабочих веществ, из которых под воздействием газового разряда в резонаторе образуется активное вещество (HCN, DCN). Рабочими веществами

являются азот и углеводородсодержащие вещества. Азот поступает из воздуха, а углеводородами могут являться, например, ацетон, метан, пропан, бутан и др. Расход этих веществ весьма незначителен; для их хранения и подачи разработан ряд портативных устройств с автоматической подачей и отключением. Эти устройства совместно с форвакуумным насосом и трубопроводом составляют систему прокачки активного вещества.

### Система накачки

В корпусе излучателя между зеркалами резонатора устанавливается разрядная трубка, в которой с помощью электродов возбуждается газовый разряд. Электроды совместно с источником тока накачки образуют систему накачки лазера. В ИРЭ НАНУ разработан ряд систем накачки и конструкций разрядных трубок. Все они могут устанавливаться в универсальном корпусе излучателя. В терагерцевом лазере может применяться система высокочастотной накачки, накачка постоянным, переменным и импульсным током.

Высокочастотная накачка осуществляется с помощью высокочастотного генератора (13,6 МГц) и электродов, установленных снаружи цельной разрядной трубки. Разработаны две системы высокочастотной накачки – с помощью цилиндрических электродов и с помощью проволочной трансформирующей спирали. Цилиндрические электроды устанавливаются снаружи разрядной трубки. При данной длине резонатора используется схема с тремя электродами.

В схеме с трансформирующей спиралью для возбуждения разряда служит проволочная спираль, навитая на разрядную трубку. Длина проволоки составляет приблизительно четверть длины волны высокочастотной накачки. Один конец спирали заземлен. Высокочастотный генератор накачки подключен в точке, находящейся в нескольких витках от заземленного конца спирали. Спиральная система накачки обеспечивает повышенную стабильность газового разряда, а также позволяет использовать для накачки генераторы низкой мощности.

Обе эти системы обеспечивают пропускание тока накачки сквозь стенки разрядной трубки, что повышает надежность лазерного излучателя. Однако при работе таких лазеров в клинических условиях возникают проб-

лемы ввиду необходимости экранирования установки от высокочастотных электромагнитных полей.

Для решения этих проблем нами разработана система накачки переменным током низкой частоты (несколько десятков кГц), не создающая радиопомех. В этой системе решена проблема пропускания тока низкой частоты сквозь стенки разрядной трубки [5] при помощи «жидких» электродов. В электродах используется электролит, прилегающий к поверхности разрядной трубки и интенсивно отводящий от нее тепло.

Разработана также система накачки при помощи коаксиальных электродов [2]. Для возбуждения газового разряда в ней использованы два электрода, герметично установленных снаружи разрядной трубки (рис. 3).

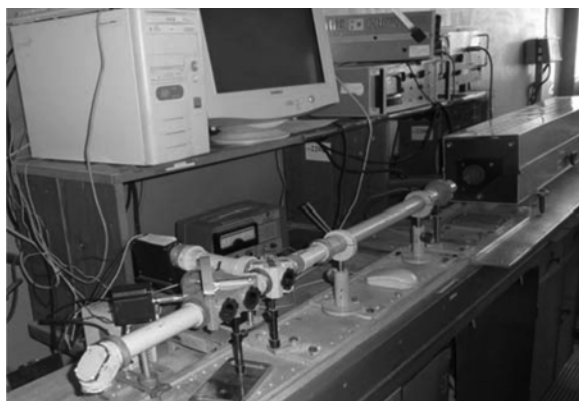


**Рис. 3. Коаксиальный электрод системы накачки**

Наружная поверхность электродов снабжена воздушным радиатором. Под электродами в стенках разрядной трубки выполнены отверстия, через которые разряд проникает внутрь трубки. Между электродами и стенками разрядной трубки имеется зазор, который служит для ликвидации локальных перегревов электрода и трубки. С помощью таких электродов можно осуществлять накачку постоянным током, переменным или импульсными токами любой частоты. При накачке током с частотой 50 Гц удается максимально упростить источник питания и повысить его надежность. При такой накачке лазерное излучение обычно генерируется в виде импульсов с частотой следования 100 Гц. Разработана методика, позволяющая снизить частоту импульсов до 50 Гц путем доработки источника питания, а также повысить частоту до 200 Гц путем перестройки резонатора.

### Квазиоптический модулятор и передача излучения к объектам исследования

Для изучения воздействия терагерцевого излучения на живые организмы часто требуется подача излучения в импульсном режиме с изменяющейся частотой следования импульсов. Перевод источника лазерного излучения в требуемый импульсный режим генерации связан с рядом технических проблем. Поэтому гораздо проще, используя непрерывный режим генерации, модулировать излучение с помощью квазиоптического модулятора. Для этого в ИРЭ НАНУ разработан механический квазиоптический амплитудный модулятор терагерцевого излучения, использующий шаговый двигатель, управляемый связанным с персональным компьютером микроконтроллером (рис. 4).



**Рис. 4.** Программируемый амплитудный модулятор, установленный в квазиоптическом тракте

Модулятор обеспечивает регулировку частоты модуляции от 0 до 30 Гц с дискретностью 0,015 Гц. Система управления модулятором, совмещенная с компьютером, дает возможность программировать различные режимы изменения частоты модуляции, что расширяет возможности исследований. Точная и с малой дискретностью регулировка частоты модуляции дает возможность исследовать зависимость процессов, происходящих в облучаемых объектах, от частоты следования импульсов излучения. Регулировка частоты модуляции, кроме прочего, позволяет отстраиваться от помех, кратных частоте сети, что обеспечивает работу измерительной аппаратуры с минимальным уровнем шума и повышает ее чувствительность. Это актуально как в медицинских, так и в физических исследованиях.

Для передачи излучения от источника к облучаемым объектам используется квазиоптический тракт на основе полого диэлектрического лучевода [7]. В отделе квазиоптики ИРЭ НАНУ разработан целый ряд уникальных квазиоптических систем и элементов [9], позволяющих производить различные манипуляции с лазерным излучением. Лазерная установка может снабжаться делителями луча, позволяющими направлять излучение по разным каналам и в различных пропорциях; аттенуаторами, вносящими заданное ослабление излучения; квазиоптическими преобразователями, увеличивающими либо уменьшающими сечение пучка излучения; манипуляторами и сканаторами, позволяющими изменять направление терагерцевого излучения без перемещения лазера.

### Выводы

Биомедицинские лазерные установки, разработанные в ИРЭ НАНУ, позволяют получить лазерное излучение с длиной волны 337 мкм, мощностью до 10 мВт с высокочастотной накачкой и до 5 мВт при накачке постоянным и переменным низкочастотным током. При использовании в качестве рабочих веществ дейтерированных соединений длина волны излучения уменьшается до 190 или 195 мкм. Эффективный диаметр пучка излучения обычно составляет около 1 см.

### Литература

1. Волноводный газовый лазер / Ю.Е. Каменев, В.К. Киселев, Е.М. Кулешов и др. // А. с. СССР №1111657 от 1989 г; МКИ H01S3/08, 3/22.
2. Газоразрядный субмиллиметровый лазер / М.Ф. Дахов, В.К. Кисельов, С.М. Кулешов та інші. // Деклараційний патент України на винахід №55720; м. кл H01S3/097 від 15.04.2003. Бюл. №4.
3. Газоразрядний субмиліметровий лазер з зовнішніми електродами / М.Ф. Дахов, В.К. Кісельов, С.М. Кулешов та інші. / Патент України на винахід №60384; м. кл H01S3/097 від 15.10.2003. Бюл. №10.
4. Киселев В.К. Автоматическая стабилизация мощности субмиллиметрового лазера / В.К. Киселев, С.В. Мизрахи / Радиопизика и электроника. – 2006. – Т.11, №1. – С. 120-123.
5. Киселев В.К. Гипервысокочастотная лазерная установка для биомедицинских исследований / В.К. Киселев, Е.М. Кулешов, В.П. Радионов // Радиопизика и электроника. – 2002. – Т.7, №1. – С.133-136.

6. Радионов В.П. Субмиллиметровый лазер с плавной перестройкой частоты излучения в пределах контура усиления // Радиофизика и электроника. – 2005. – Т.10, №1. – С. 150-153.

7. Усиков А.Я. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / А.Я. Усиков, Э.А. Канер, И.Д. Трутень. – Киев: Наукова думка, 1986. – 368 с.

8. Influence of low-energetic submillimeter laser radiation on posttraumatic skin wounds /

V.K. Kiseliiov, Ye.M. Kuleshov, V.I. Makolinets et al. // Ukraine Symp.Proc. – 2007. – Vol. 2. – P. 907-909.

9. Kiseliiov V.K The resonator of the terahertz laser with smooth adjustment coupling / V.K. Kiseliiov, V.P. Radionov // Proc. 4 Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2008). – Alushta, Crimea, 2008. – P. 310-312.

#### ТЕРАГЕРЦЕВІ ЛАЗЕРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*V.K. Kiseliov, S.V. Mizrahi, V.P. Radionov*

*Інститут радіофізики та електроніки ім. А.Я. Усікова НАН України,*

*61085 Україна, м. Харків, вул. Акад. Прокура, 12,*

*тел.: 380-57-720-33-35,*

*E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua*

*Описані конструкція і можливості розроблених авторами терагерцевих лазерних установок, створених на основі HCN і DCN лазерів з довжиною хвилі випромінювання 337, 190 та 195 мкм, які призначені для біомедичних досліджень. Розглянуті системи високочастотної і низькочастотної накачки лазерів, контролювання довжини хвилі та плавної зміни коефіцієнту проходження вивідного дзеркала резонатора. Запропоновано додаткове квазіоптичне обладнання, зокрема програмований модулятор, що дозволяє перетворювати неперервне лазерне випромінювання в імпульсне з керованою і точно контрольованою зміною частоти слідування імпульсів, система автоматичної стабілізації потужності та інші.*

**Ключові слова:** газорозрядний терагерцевий лазер, квазіоптика, амплітудна модуляція, біомедичні дослідження.

#### THz LASERS FOR BIOMEDICINE RESEARCH

*V.K. Kiseliiov, S.V. Mizrakhy, V.P. Radionov*

*Institute of Radiophysics and Electronics of A.J. Usikova NAS of Ukraine,*

*61085 Ukraine, Kharkov, Akad. Proskura Str., 12,*

*tel.: 380-57-720-33-35,*

*E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua*

*The design and potentialities of THz lasers for biomedicine at the base of gas-discharge HCN and DCN lasers with 337, 190 and 195  $\mu\text{m}$  radiation wavelengths are described. The systems for high/low frequency laser pumping, wavelength control and smooth variation of transmission coefficient for output resonators mirror is considered. The additional quasi-optical instruments are presented. The programmable modulator which transforms continuous laser radiation into impulses with fine controlled variation of pulse repetition frequency, automated laser power stabilization system are described etc.*

**Key words:** gas-discharge THz laser, quasi-optics, amplitude modulation, biomedical investigations.