

Иманкулов Закиржон Иманкулович, к.ф.-м.н., доцент,  
Жалал-Абадский государственный университет  
им. Б.Осмонова, E-mail: imankulovz@bk.ru

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕЛИЙ-НЕОНОВОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ СВЧ РАЗРЯДЕ**

*В настоящей работе проведены теоретические расчеты для одночастотного гелий-неонового лазера с поперечным СВЧ разрядом и теоретически доказано выполнения условия  $d \geq A$  где  $d$  - внутренний диаметр разрядной трубки,  $A$  - амплитуда колебаний свободного электрона, для разрядных трубок с внутренним диаметром 2,3 мм*

*Ключевые слова: лазер, плазма, излучения, разрядная трубка, поперечный, сверхвысокочастотный (СВЧ), разряд, одночастотный, возбуждения, частота*

Иманкулов Закиржон Иманкулович, ф.-м.и.к., доцент,  
Б.Осмонов атындагы Жалал-Абад мамлекеттик  
университети

### **ТУУРАСЫНАН ӨТӨ ЖОГОРКУ ЖЫШТЫКТАГЫ РАЗРЯД МЕНЕН ДҮҮЛҮКТҮРҮЛГӨН ГЕЛИЙ-НЕОН ПЛАЗМАСЫНДАГЫ ЭЛЕКТРОНДОРДУН ТЕРМЕЛҮҮСҮН ТЕОРИЯЛЫК ИЗИЛДӨӨ**

*Макалада туурасынан өтө жогорку жыштыктуу разряд менен дүүлүктүрүлгөн бир жыштыктуу He-Ne лазерини жогорку басымда нур чыгаруусу үчүн разряд трубкасынын ички диаметри менен өтө жогорку жыштыктуу разрядтын жыштыгы ортосундагы аткарылуучу шарт теориялык эсептөө жолу менен табылган*

*Ачкыч сөздөр: лазер, плазма, нурдануу, разряд түтүкчө, туурасынан, өтө жогорку жыштыктуу, бир жыштыктуу, дүүлүктүрүү, жыштык*

Imankulov Zakirjon Imankulovich, candidate of physical  
and mathematical sciences, associate professor,  
Jalal-Abad State University named after B.Osmonov

### **THEORETICAL STUDY OF ELECTRON OSCILLATIONS IN HELIUM-NEON PLASMA UNDER TRANSVERSE MICROWAVE DISCHARGE**

*In this paper, theoretical calculations were carried out for a single-frequency helium-neon laser with a transverse microwave discharge and theoretically proved the fulfillment of the condition  $d \geq A$ , where  $d$  is the inner diameter of the discharge tube,  $A$  is the amplitude of the oscillations of the free electron, for discharge tubes with an inner diameter of 2.3 mm.*

*Key words: laser, plasma, radiations, bit tube, transversal, super-high-frequency (SHF), digit one frequency, excitations, frequency.*

Для решения проблем создания He-Ne лазеров с поперечным ВЧ и СВЧ разрядом (ПВЧР и ПСВЧР) необходимо выбрать систему возбуждения, разработать их конструкцию, провести комплекс исследований различных параметров и характеристик

и оптимизировать их работу. При выборе типа и конструкции системы, формирующей ВЧ и СВЧ полей накачки, необходимо учитывать следующие требования:

- достижение максимальной концентрации энергии ВЧ и СВЧ поля в области активной части газоразрядной трубки;
- получение напряженности и частоты СВЧ поля, необходимой и достаточной для создания и поддержания стабильного газового разряда;
- осуществление простого и вместе с тем эффективного согласования СВЧ генератора накачки с электродной системой;
- простота конструкции активного элемента и системы накачки, малые габариты и вес;
- достижение максимальной энергии и концентрации электронов в поперечном ВЧ и СВЧ разряде для накачки He-Ne лазера.

Для выполнения выше перечисленных требований могут быть предложены различные варианты схем систем накачки [1,2]. Так, например, система накачки может строиться таким образом, чтобы нагрузка (активный элемент) подключалась к генератору накачки через промежуточные каскады, в том числе и согласующие элементы. При этом обеспечивается большая стабильность выходных параметров автогенератора накачки и повышается его устойчивость к перенапряжениям. Однако в подобных схемах автогенератора при зажигании и в процессе горения ВЧ и СВЧ разряда изменяется импеданс нагрузки, что приводит к необходимости перестройки частоты задающего автогенератора и значительно усложняет реализацию системы возбуждения в целом.

Более простой оказывается однокаскадная схема автогенератора на сосредоточенных или распределенных элементах. В первом случае емкостью колебательного контура и активной нагрузкой служат полосковые электроды совместно с разрядной трубкой, установленной на поверхности ее по всей длине. Во втором случае колебательным контуром и одновременно нагрузкой являются четвертьволновые разомкнутые линии совместно с разрядной трубкой. В этих случаях при зажигании разряда происходит затягивание частоты колебаний автогенератора накачки. Автогенератор становится универсальным: служит одновременно для поджига разряда и накачки лазера. Такой автогенератор, собранный в зависимости от частотного диапазона на сосредоточенных или распределенных элементах должен:

- в режиме поджига устойчиво осуществлять перекачку высокочастотной энергии к нагрузке без отражения;
- вместе с реактивными элементами СВЧ транзистора обеспечить резонанс на выбранной частоте накачки.

Для накачки He-Ne лазера лучше использовать транзисторные варианты автогенераторов, принципиальная схема которой представлена на [2].

Практический выбор частоты конкретного автогенератора накачки при прочих равных условиях зависит от конкретной электрической схемы автогенератора на сосредоточенных элементах. Частота определяется величиной индуктивности и емкости полосковых электродов колебательного контура и внутреннего диаметра разрядной трубки. При использовании схемы СВЧ автогенератора на распределенных элементах в виде четвертьволновых полосковых линий частота определяется длиной полосковой линии. При этом в качестве колебательного контура могут быть использованы как разомкнутая, так и короткозамкнутая четвертьволновая полосковая линия. Преимущество разомкнутой по сравнению с короткозамкнутой полосковой линией состоит в том, что напряжение вдоль линии превышает напряжение на входе, тогда как напряжение между полосками короткозамкнутой линии в любой точке меньше напряжения горения на ее входе.

В связи с этим предпочтительны схемы СВЧ автогенераторов на разомкнутых четвертьволновых полосковых линиях. Нами использован вариант схемы, описанной в

[2]. Так как применение схемы автогенератора, частью колебательного контура, которого являются разомкнутые четвертьволновые полосковые линии (распределенные элементы), наложенные на газоразрядную трубку со смесью газов позволяет, по сравнению с автономным генератором с усилительными каскадами, устойчиво осуществлять перекачку энергии к нагрузке без отражений. И вместе с реактивными элементами СВЧ транзистора обеспечивает резонанс на выбранной частоте, а по сравнению с автогенераторами на сосредоточенных элементах [1] позволяет получить более высокую добротность из-за уменьшения активных потерь на самом колебательном контуре и более высокую частоту генерации. Как видно из формулы [7]:

$$W = U^2 \varepsilon \varepsilon_0 l h \omega / 4 d_0$$

в которой  $W$  - мощность СВЧ поля, передаваемая плазме газового разряда,  $U$  - СВЧ напряжение, приложенное к СВЧ электродам,  $\varepsilon$  - электрическая проницаемость материала разрядной трубки,  $l$  и  $h$  - длина и ширина СВЧ электрода,  $d_0$  - толщина стенки трубки,  $\omega$  - частота СВЧ поля.

Более высокая частота СВЧ генератора позволяет улучшить передачу СВЧ энергии в плазму газового разряда. Очевидно, для высокой частоты требуются короткой длины полосковые линии. Считалось, что СВЧ генератор нагружен на активное оптимальное сопротивление, так как при давлениях газовой смеси больших до 6 Торр из-за того, что  $v_{CT} \gg \omega$ , как показано в работе [3,4], проводимость газового разряда можно считать чисто активной. При расчетах влиянием реактивной составляющей проводимости газового разряда пренебрегалось. При выборе двухполосковой четвертьволновой линии в качестве устройства, формирующего поле накачки, принималось во внимание то, что она характеризуется хорошей концентрацией СВЧ поля в приосевой области разрядной трубки и возможностью поддержания необходимой для разряда напряженности поперечного СВЧ поля. Поперечные размеры устройства малы по сравнению с длиной волны колебаний СВЧ поля на частоте накачки, что обеспечивает незначительность антенного эффекта. При установке наружного экрана его влияние на работу СВЧ генератора накачки становится практически незаметным. Линия может являться самостоятельным элементом конструкции лазера, обеспечивая свободную смену разрядной трубки без отпайки или разъединения электрических контактов, либо конструктивно изготавливается в единстве с разрядной трубкой (приклеивается, напыляется, крепится изоляционными материалами на поверхность разрядной трубки). СВЧ полосковые электроды изготавливались из медного материала толщиной 0,3 - 1 мм. Поверхность, соприкасающаяся с разрядной трубкой, хорошо полировалась и для уменьшения потерь СВЧ мощности покрывалась пленкой серебра. Разрядные трубки изготавливались из стекла С52-1, кварца или керамики 22ХС.

Для накачки He-Ne лазеров нами использовались автогенераторы, собранные на транзисторах КТ-907, КТ-930 и КТ-970 по схеме, приведенной на [1,2]. Частота СВЧ колебаний составляла порядка 200 - 700 МГц.

Недостатком схемы на транзисторе КТ-907 является малая мощность генерируемой СВЧ энергии, но поскольку этот транзистор высокочастотный, то он эффективен при создании разряда в коротких активных элементах атомарных газовых лазеров. Наилучшими характеристиками по мощности и по частоте вырабатываемых СВЧ колебаний обладает автогенератор, на транзисторе КТ-930 Б. Он развивает значительную СВЧ мощность (~35 Вт) при КПД порядка 50 - 60%. В зависимости от внутреннего диаметра разрядной трубки лазера выбирается частота СВЧ генератора накачки. Для накачки лазера с узкой разрядной трубкой необходимы сверхвысокие частоты. При этом для получения и поддержания разряда необходимо выполнение условия

$$d \geq A \quad (1)$$

где  $d$  - внутренний диаметр разрядной трубки,  $A$  - амплитуда колебаний свободного электрона в разряде под действием СВЧ поля.

Таким образом, путем управления напряжения или частоты СВЧ поля можно добиться выполнения условия  $d \geq A$  (1) для разрядных трубок с различными внутренними диаметрами.

Нами проведены теоретические расчеты для проверки выполнения условия (1) для одночастотного гелий-неонового лазера с поперечным СВЧ разрядом описанной в [5,6]. Амплитуда колебаний свободного электрона  $A$  определяется по формуле [3,4]:

$$A = \frac{eE}{mv_m \omega}$$

где  $E$  - напряженность СВЧ поля,  $e$  и  $m$  - заряд и масса электрона,  $v_m$  - частоты столкновений электронов с атомами,  $\omega$  - частота СВЧ поля.

На частоте 300 МГц [5,6] характерная для газов гелий-неон при давлении  $P=6$  мм рт. ст. и соотношении смеси газов  $X=6:1$  [5] частота столкновений равна  $v_m \approx 1,8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$  и превышает  $\omega = 1,88 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$  что выполняется условия  $v_m^2 \gg \omega^2$ . Это значит, что на данной частоте уже при  $P > 0,6$  Тор колебания являются дрейфовыми. Указанной частоте столкновений соответствует подвижность

$$(\mu_e = e/mv_m), \quad \mu_e \approx 1 \cdot 10^5 [\text{Тор}] \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}).$$

Для поддержания слабоионизированной плазмы среднего давления [5,6] требуются приведенные поля  $E/p \approx 9 \text{ В} / (\text{см} \cdot \text{Тор})$ . Амплитуды дрейфовых колебаний в этом диапазоне  $E/p$  составляют  $A \approx 2,8 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$ . Они малы по сравнению с типичными для разрядной практики расстояниями между электродами ( $L \approx 2 - 6 \text{ мм}$ ).

И так, мы теоретически доказали выполнения условия  $d \geq A$  для разрядных трубок с внутренним диаметром 2,3 мм. При выполнении условия (1) потеря электронов за счет столкновения со стенкой разрядной трубки резко уменьшается. В результате появляется большой концентрации электронов в области активной части газоразрядной трубки, имеющие высокие энергии которые способствует возможностью получения генерации на гелий-неоновом лазере в поперечном ВЧ и СВЧ разряде при высоких давлениях смеси газов в разрядной трубке [5,6].

#### Литература:

1. Геллер, В.М. Использование газового СВЧ разряда в He-Ne лазерах. [Текст] / Г.И. Гриф, В.А. Хрусталев // Автометрия. -1984. -№1. - с.35-45.
2. Иманкулов, З.И. Конструкции активного элемента с поперечными ВЧ и СВЧ разрядами и исследование оптимальных режимов его работы. [Текст] / К.А.Мурзалиев // Материалы V региональной НТК «Современные проблемы науки, техники и образования» 2-3 июня 2006 г. Жалалабат, ЖАГТИ. (Сб. науч. тр), стр. 22-26.
3. Иманкулов, З.И. Исследование одночастотного режима генерации в мощном He-Ne лазере с ПСВЧР [Текст] / М.М.Миринойтов // Журнал прикладной спектроскопии, 1997, т.64, №1, стр.116-118.
4. Иманкулов, З.И. Малошумящий одночастотный He-Ne лазер со стабильной мощностью излучения на длине волны 1,52 мкм [Текст] / М.М. Миринойтов // Журнал прикладной спектроскопии, 2000, т.67, №1, стр.127-128.
5. Михайлевский, В.С. и др. Генератор радиоимпульсов для лазеров с поперечным ВЧ разрядом. [Текст] // ПТЭ.-1980.-№5.-с.207-209.
6. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда, 2-е изд. [Текст] // М.: Наука, 1992.
7. Райзер, Ю.П. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения: Учеб. пособие: Для вузов. [Текст] / М.Н. Шнайдер, Н.А. Яценко // М.: Изд-во МФТИ; Наука. Физматлит. 1995, -320 с.

