

Гелий - неоновый лазер в продольных однородных магнитных полях встречных направлений

Исследуемый нами линейный лазер имеет следующие параметры:

1. Резонатор Фабри-Перо длиной 150 см с диэлектрическими зеркалами, напыленными на длину волны 0.63 мк, с коэффициентами отражения, позволяющими генерировать лазером длины волн 0.63 мк и 3.39 мк. Расстояние между модами резонатора равно 100 МГц.
2. Активная среда состоит из трубки длиной 90 см, имеющая на торцах окна Брюстера и наполненная газом гелий-неоновой смеси, который возбужден так, что может усиливать длины волн 0.63 мк и 3.39 мк на связанных переходах рабочих уровней неона. Известно, что ширина неоднородно уширенного контура усиления для излучения длины волны 0.63 мк равна 1500 МГц, а для излучения с длиной волны 3.39 мк равна 300 МГц. Т.е. лазер является многочастотным для обеих длин волн при межмодовом расстоянии резонатора в 100 МГц. Лазер генерирует обе эти длины волн одновременно. Фотоприемники, способные принимать излучение соответствующих длин волн отдельно, расположены по обе стороны от лазера на его оси.
3. На трубку активной среды намотаны два соленоида с длиной намотки 40 см каждый и средним диаметром намотки 1.15 см и включенных навстречу друг к другу. При протекании тока встречных направлений через соленоиды вдоль оси трубки активной среды создается продольное однородное (диаметр намотки намного меньше длины намотки) магнитное поле встречных направлений. Будем считать, что в первой (левой) половине длины активной среды создается однородное магнитное поле положительного направления, а во второй (правой) половине создается однородное магнитное поле отрицательного (встречного) направления. Расчеты по формулам, определяющим величину магнитного поля на оси внутри соленоида и за его пределами [1] показывают, что магнитное поле внутри соленоида вдоль оси имеет постоянную величину (однородное) и начинает уменьшаться до половины его величины на расстоянии 1 см от края соленоида, а переход от положительного направления на отрицательное направление (градиент) составляет 2 см. Т.е. на данном переходе (2 см) возникает неоднородное магнитное поле, которым при длине двух соленоидов в 80 см можно пренебречь. Диаметр провода намотки равен 0.8 мм. Количество намотанных витков на один см соленоида равно 33. Сопротивление обмоток двух соленоидов равно 5 ом, индуктивность обмоток двух соленоидов, включенных навстречу друг к другу, равна 450 мкГн.

4. В эксперименте также использовался одночастотный линейный гелий-неоновый лазер с такими параметрами: генерируемая длина волны излучения равна 3.39мк, длина резонатора равна 26 см, межмодовое частотное расстояние равно 577МГц. Одно из зеркал резонатора наклеено на мембрану наушника и могло перемещаться вдоль оси резонатора на несколько длин волн, изменяя длину резонатора. На трубку активной среды длиной 18.7 см были намотаны два соленоида длиной 8 см каждый. Количество витков на единицу длины соленоида равно 66 1/см, средний диаметр намотки равен 1.7 см. Выходные окна на торцах трубки активной среды наклеены перпендикулярно к оси трубки, позволяющие лазеру генерировать циркулярно поляризованные волны. Обмотки соленоидов могли включаться последовательно, создавая вдоль оси активной среды магнитное поле одного направления, а также включаться навстречу друг к другу, создавая магнитные поля встречных направлений вдоль длины активной среды.

5. В эксперименте удобно пользоваться такими физическими величинами:

1. током соленоида $I(a)$,

2. характеристикой соленоида, указывающей, какое количество эрстед

$\partial H(\text{э/а})$ магнитного поля соленоида образуется вдоль оси трубки

активной среды на один ампер тока соленоида,

3. средний вдоль длины соленоида коэффициент, связанный с неоднородностью магнитного поля вдоль оси трубки активной среды K ,

4. характеристикой активной среды, указывающей, какое частотное расщепление рабочих уровней активной среды вызывает магнитное поле в один эрстед (величина для всех сред одинаковая) $\partial \nu$ МГц/э.

6. Напряженность магнитного поля в эрстедах вдоль активной среды определялась по формуле [1] :

для многочастотного лазера

$$H(\text{э}) = \left[3300 \frac{4\pi}{10^3} I(a) \right] (\text{э/а}) = 41.5(\text{э/а})I(a) = \partial H(\text{э/а})I(a),$$

$$\partial H(\text{э/а}) = 41.5(\text{э/а}), \quad (1)$$

для одночастотного лазера

$$\partial H(\text{э/а}) = 83(\text{э/а}). \quad (2)$$

7. Частотное расщепление рабочих уровней активной среды, которое вызывает магнитное поле в один эрстед пропорционально $\partial \nu$ (МГц/э) и определяется из соотношения (система СИ) [2]:

$$\frac{M_B \mu_0 H}{h} = \partial \nu (\text{МГц/э}) H(\text{э}),$$

$$\begin{aligned}
M_B &= 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}, \\
\mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, \\
h &= 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}, \\
\frac{9.27 \cdot 10^{-24} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3}{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 4\pi} \text{ гц/эН(э)} &= 1.4 \cdot 10^6 \text{ гц/эН(э)}, \\
\partial \nu &= 1.4 \text{ Мгц/э}.
\end{aligned} \tag{3}$$

8. Известно [2], что если магнитное поле параллельно оси лазера, то при наблюдении вдоль магнитного поля обнаруживаются три перехода (с верхнего рабочего уровня на нижний с излучением квантов энергии) с левой круговой поляризацией ($\Delta m=+1$) и три перехода с правой круговой поляризацией ($\Delta m=-1$). Для переходов с левой круговой поляризацией частоты отличаются от $[E_2(0)-E_1(0)]$ на величину $-\frac{M_B \mu_0 H}{h}$, а для переходов с правой круговой поляризацией - на величину $\frac{M_B \mu_0 H}{h}$. Вследствие теплового движения возбужденных атомов доплеровски уширенные линии образуют контуры усиления электромагнитной волны с левой круговой поляризацией и правой соответственно, отстоящие друг от друга на величину $2 \frac{M_B \mu_0 H}{h}$. Для переходов с нижнего рабочего уровня на верхний с поглощением квантов энергии значение Δm меняется на противоположное т.е. контур поглощения с частотой ниже центра поглощает волну правой круговой поляризации, а контур поглощения с частотой выше центра поглощает волну левой круговой поляризации.

9. Эксперимент проводился как с последовательно включенными соленоидами, так и с соленоидами включенными навстречу друг к другу. При этом наблюдалось существенное различие в поведении интенсивности излучения выхода лазеров в зависимости от величины тока, протекающего через соленоиды.

10. При последовательном включении соленоидов многочастотный лазер генерировал излучение, интенсивность которого практически не зависела от силы тока, протекающего через соленоиды (от нуля до 6 а). Это соответствует изменению магнитного поля от нуля до 15 э при этом контуры генерации для левой и правой круговых поляризаций расщепляются от нуля до 700 Мгц соответственно. При частотной ширине контура генерации в 300 Мгц в эти контуры постоянно вмещаются две моды при движении этих контуров вдоль шкалы частот, при этом суммарная интенсивность всех генерируемых мод остается неизменной.

11. При последовательном включении соленоидов одночастотный лазер генерировал излучение, интенсивность которого слабо зависила от силы тока (уменьшилась в два раза), протекающего через соленоиды (от нуля до 4.5 а). Это соответствует изменению магнитного поля от нуля до 370 э при этом контуры генерации для левой и правой круговых поляризации расщепляются от нуля до 1000 Мгц соответственно. Уменьшение интенсивности объясняется наличием неоднородности магнитного поля вдоль оси соленоидов ($K=0.828$). При сканировании длины резонатора мода резонатора очерчивает контур генерации лазера. При протекании тока через соленоиды на осциллографе наблюдается расщепление контуров генерации волн с левым и правым вращением поляризации вектора волны. Если частота расщепления контуров равна или кратна половине межмодового частотного расстояния, на экране осциллографа наблюдается симметричная картинка зон одночастотной генерации в два раза чаще по сравнению с картинкой зон генерации при отсутствии магнитного поля. Если частота расщепления контуров равна или кратна межмодовому частотному расстоянию, на экране осциллографа наблюдается картинка сравнима с картинкой при отсутствии магнитного поля.

12. Известно, что коэффициент усиления активной среды генерируемой волны лазером равен коэффициенту потерь и пропорционален разности населенностей рабочих уровней. Т.е. волна взаимодействует с верхним рабочим уровнем (индуцированный переход с верхнего уровня на нижний с усилением волны) и та же волна взаимодействует с нижним рабочим уровнем (индуцированный переход с нижнего уровня на верхний с поглощением волны). При этом изменение населенности каждого уровня пропорционально населенности соответствующего уровня. При наложении продольного магнитного поля на активную среду снимается вырождение как по частоте индуцированных переходов с уровня на уровень, так и по направлению вращения круговых поляризации волн взаимодействия. Рассмотрим случай, когда частотное расщепление контуров зон генерации равно или больше ширины зоны генерации. В контуре с частотой ниже центра лазер генерирует волну левой круговой поляризации. Естественно предположить, что коэффициент усиления этой волны пропорционален разности населенности рабочих уровней. Но при этом надо учесть, что индуцированный переход с верхнего уровня на нижний ($\Delta m = +1$) взаимодействует с волной левой круговой поляризации и усиливает ее пропорционально населенности верхнего уровня. Но эта же волна должна индуцированно взаимодействовать с переходом с нижнего уровня на верхний ($\Delta m = -1$) с поглощением пропорционально населенности нижнего уровня, но уже быть волной правой круговой поляризации. Это возможно при условии, что в резонаторе волна распространяется в прямом направлении левой круговой поляризации, а после

отражения от зеркала резонатора становится правой круговой поляризацией и распространяется в обратном направлении. Т.е. зеркало при отражении волны меняет вращение вектора круговой поляризации на противоположное. Таким образом одна и та же волна меняя вращение вектора круговой поляризации индуцированно взаимодействует с переходом с верхнего уровня на нижний и с нижнего уровня на верхний одновременно и в результате коэффициент усиления оказывается пропорциональным разности населенности рабочих уровней. Выше было приведено качественное объяснение условий генерации лазера в сильном продольном магнитном поле.

13. При включении соленоидов навстречу друг к другу активная среда многочастотного лазера оказывается в магнитном поле встречных направлений. При изменении тока соленоидов от нуля до 2,4 а, что соответствует изменению магнитного поля от нуля до 100 э, расщепление контуров зон генерации для волн с левой и правой круговой поляризацией изменялось от нуля до 280 МГц. При этом интенсивность генерации на выходе лазера уменьшалась по линейному закону и при расщеплении контуров зон генерации в 280 МГц интенсивность на выходе лазера равнялась нулю. Следует предположить, что величина в 280 МГц это и есть ширина контуров усиления активной среды для волн левой и правой круговой поляризации. При расщеплении этих контуров на величину в 280 МГц они не перекрываются и лазер не генерирует. Т.е. лазер может генерировать только в зоне перекрытия этих контуров.

14. При включении соленоидов навстречу друг к другу активная среда одночастотного лазера оказывается в продольном магнитном поле встречных направлений. При изменении тока соленоидов от нуля до 1.55 а, что соответствует изменению магнитного поля от нуля до 130 э, расщепление контуров зон генерации для волн с левой и правой круговой поляризацией изменялось от нуля до 360 МГц. При сканировании длины резонатора и увеличении тока соленоидов на экране осциллографа зоны генерации остаются неподвижными (расщепление контуров зон генерации для лево и право поляризованных волн не наблюдается), уменьшаются по амплитуде и при токе в 1.55 а генерация лазера не наблюдается. Это соответствует расщеплению контуров усиления для лево и право поляризованных волн на 360 МГц. При ширине контуров усиления в 360 МГц и таком же расщеплении контуры не перекрываются и генерация отсутствует. Т.е. генерация лазера наблюдается в зоне перекрытия контуров усиления для лево и право поляризованных волн. И эта зона остается неподвижной при расщеплении контуров усиления и уменьшается при увеличении расщепления до нуля.

15. Качественный расчет суммарного коэффициента усиления и поглощения при распространении волны сквозь активную среду в прямом и обратном направлениях между зеркалами резонатора с учетом преобразования волны при

отражении от зеркал показывает, что нет никакого различия при создании продольного магнитного поля соленоидами, включенными последовательно или навстречу друг к другу (если пренебречь участком перехода магнитного поля из прямого направления на обратное). Или по непонятным причинам узкий участок перехода магнитного поля из прямого направления на обратное играет роль своеобразного частотнозависимого затвора, или, если пренебречь этим участком, современная теория не может объяснить поведение генерации лазера в встречных магнитных полях.

Литература

1. Б.М. Яворский и А.А. Детлаф, Справочник по физике, 433-435,(1968).
2. В. Беннет, Газовые лазеры, 113-116, (1964).