

Сканирование частоты лазера с резонатором Литтмана – Меткалфа с помощью электрооптического дефлектора

С.В.Васильев, Л.И.Ивлева, В.А.Сычугов

Предложен и экспериментально реализован новый способ сканирования частоты одночастотного лазера с резонатором Литтмана – Меткалфа, основанный на использовании электрооптического дефлектора. Основными преимуществами такого способа сканирования являются высокая точность и скорость перестройки частоты, а также отсутствие подвижных элементов. Показано, что существует конфигурация резонатора, позволяющая синхронизировать изменения длины волны лазерного излучения и оптической длины резонатора и обеспечивающая отсутствие перескоков моды при сканировании.

Ключевые слова: перестройка частоты, оптический резонатор, одночастотный лазер.

1. Введение

Перспективной схемой резонатора для узкополосных перестраиваемых лазеров является схема резонатора с дифракционной решеткой, установленной под углом скользящего падения, – так называемая схема Литтмана – Меткалфа или GIG-резонатор [1, 2]. Схема такого резонатора приведена на рис.1. Резонатор образован зеркалами 1, 2 и дифракционной решеткой 3. Длина волны генерации лазера с GIG-резонатором определяется соотношением

$$\lambda = A(\sin \theta + \sin \varphi), \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; A – период дифракционной решетки; θ – угол падения излучения на решетку; φ – угол дифракции. Сканирование частоты лазера осуществляется поворотом зеркала 2 (изменением угла φ). Вывод излучения обычно происходит через так называемый зеркальный порядок решетки. Высокая дисперсия решетки делает возможной работу лазера в узкополосном и даже одночастотном режиме без использования расширителей пучка и дополнительных внутрирезонаторных селекторов частоты.

Таким образом, основным преимуществом лазеров с GIG-резонатором является предельная простота конструкции. Минимальное число элементов, составляющих резонатор, делает лазер простым в управлении и повышает стабильность его характеристик. К недостаткам лазеров с GIG-резонаторами следует отнести сравнительно невысокий КПД, определяемый низкой дифракционной эффективностью существующих решеток, при предельно малых углах падения. Тем не менее лазеры с GIG-резонатором получили достаточно широкое распространение. Целью настоящей работы является реализация электрооптического метода сканирования частоты узкополосного лазера с резонатором Литтмана – Меткалфа и исследование его характеристик.

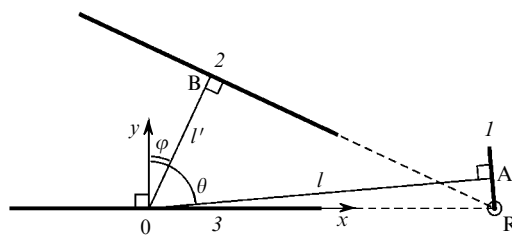


Рис.1. Принципиальная схема GIG-резонатора, позволяющая избежать перескока моды при сканировании частоты:

1, 2 – зеркала; 3 – дифракционная решетка; знак \square обозначает прямой угол.

2. Использование электрооптического дефлектора для сканирования частоты лазера с GIG-резонатором

Обычно перестройка частоты лазера с GIG-резонатором осуществляется поворотом зеркала 2 (см. рис.1). Для плавного сканирования частоты одночастотного лазера необходимо синхронизировать изменения длины волны генерации и оптической длины резонатора так, чтобы при сканировании не происходило перескока моды. Использование GIG-резонатора позволяет реализовать плавное сканирование частоты, практически не усложняя конструкцию лазера. Если GIG-резонатор отъюстирован так, что плоскости всех элементов резонатора пересекаются вдоль общей прямой, проходящей через точку R перпендикулярно плоскости резонатора, и ось вращения зеркала 2 также совпадает с этой прямой, то перескок моды при сканировании происходить не будет (см. рис.1) [3].

Для того чтобы проверить это свойство GIG-резонатора поместим начало декартовой системы координат в центр дифракционной решетки 3. Пусть l и l' – длины плеч резонатора. Легко видеть, что если длина плеча l зафиксирована, то

$$\frac{l'}{l} = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta}, \quad (2)$$

а общая длина резонатора

$$L = l' + l = \frac{\sin \varphi + \sin \theta}{\sin \theta} l. \quad (3)$$

Из (1) и (2) следует, что продольный индекс моды

$$q = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2l}{A \sin \theta}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что продольный индекс не зависит от угла дифракции φ и длины волны генерации λ и не изменяется при повороте зеркала 2.

Основной проблемой, возникающей при практической реализации плавного сканирования частоты лазера, является высокая скорость перестройки частоты ν . Из (1) нетрудно получить выражение для скорости сканирования:

$$\frac{d\nu}{d\varphi} = -\frac{c}{A} \frac{\cos \varphi}{(\sin \varphi + \sin \theta)^2}, \quad (5)$$

где c – скорость света. Подставляя в (5) типичные для GIG-резонатора значения параметров ($\theta \approx 89^\circ$, $\varphi \approx 30^\circ$, $\lambda/A \approx 1.5$), получаем скорость сканирования примерно 10^4 ГГц/°. Другими словами, для того чтобы настроить частоту лазера с точностью порядка 100 МГц зеркало 2 необходимо установить с точностью 10^{-5} угл.град. ($0.05''$).

Для решения этой проблемы в работах [4, 5] было предложено сканировать частоту лазера с GIG-резонатором поворотом стеклянного клина, помещенного между зеркалом 2 и решеткой 3. Клин с небольшим углом при вершине играет роль оптического редуктора, позволяющего снизить скорость сканирования на 2–3 порядка. Более того, проведенное в работе [6] теоретическое исследование показало, что существует конфигурация GIG-резонатора с редуктором, позволяющая избежать перескока моды при перестройке частоты лазера.

Введение в резонатор дополнительного подвижного элемента существенно усложняет кинематическую схему и процедуру юстировки лазера, что сводит на нет все преимущества использования оптического редуктора. В связи с этим мы предлагаем использовать для перестройки частоты GIG-резонатора клин, изготовленный из электрооптического материала (электрооптический дефлектор), причем сканирование осуществляется не механическим поворотом клина, а изменением его показателя преломления.

Схема GIG-резонатора с электрооптическим дефлектором показана на рис.2. Резонатор включает в себя зеркало 1, дифракционную решетку 3 и дефлектор 4. Зеркало резонатора 2 нанесено на заднюю грань дефлектора, а электроды 5 – на его боковые поверхности. Грубая настройка частоты лазера осуществляется механическим поворотом дефлектора (изменением угла β), а точное сканирование – изменением его показателя преломления n . Если плоскости всех элементов резонатора пересекаются вдоль общей прямой, проходящей через точку R перпендикулярно плоскости резонатора (рис.2), и ось вращения дефлектора совпадает с этой прямой, то перескока лазерной моды не будет происходить как при плавном, так и при грубом сканировании частоты [6]. Доказательство этого свойства GIG-резонатора анало-

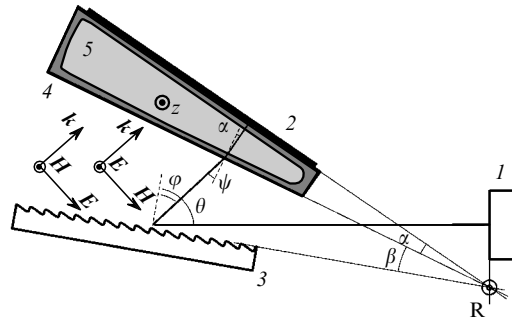


Рис.2. Схема GIG-резонатора с электрооптическим дефлектором: 1, 2 – зеркала; 3 – дифракционная решетка; 4 – электрооптический дефлектор; 5 – электроды, к которым прикладывается управляющее напряжение; z – оптическая ось кристалла; α – угол преломления клина; β – угол между дефлектором и решеткой; ψ – угол падения излучения на дефлектор.

гично доказательству, проведенному выше, для случая «стандартного» способа сканирования лазера, однако оно более громоздко и здесь не приводится.

Основными преимуществами предлагаемого механизма точного сканирования частоты GIG-резонатора являются отсутствие подвижных компонентов, а также сохранение предельной простоты резонатора. Грубая настройка лазера осуществляется простым поворотом дефлектора, при этом самосогласованная (позволяющая избежать перескока моды) конфигурация резонатора сохраняется. Как показано в [6], для плавного сканирования частоты лазера в диапазоне нескольких обратных сантиметров точность настройки положения дефлектора по отношению к зеркалу 1 и решетке 3 должна составлять десятые доли миллиметра, что является вполне приемлемым.

Оценим скорость и диапазон сканирования частоты лазера с помощью дефлектора. Из (5) получим

$$\frac{d\nu}{dn} = -\frac{c}{A} \frac{\cos \varphi}{(\sin \varphi + \sin \theta)^2} \frac{d\varphi}{dn}. \quad (6)$$

Из рис.2 нетрудно определить, что

$$\varphi = \psi + \beta \quad (7)$$

и

$$\sin \varphi = n \sin \alpha \cos \beta + \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha} \sin \beta. \quad (8)$$

Подставив (8) в (6), приходим к выражению

$$\frac{d\nu}{dn} = -\frac{c}{A} \frac{\cos \varphi}{(\sin \varphi + \sin \theta)^2} \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (9)$$

Используя стандартные для GIG-резонатора значения параметров, получим, что для сканирования частоты лазера в диапазоне 300 ГГц (10 см^{-1}) показатель преломления дефлектора должен измениться примерно на 0.005, что соответствует характеристикам современных электрооптических кристаллов.

3. Исследование характеристик лазера с дефлектором на кристалле SBN

Высокие электрооптические коэффициенты и широкий диапазон прозрачности делают монокристаллы SBN ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$) одним из наиболее перспективных мате-

риалов для создания эффективного электрооптического дефлектора [7].

Кристаллы SBN относятся к классу симметрии $4mm$. Это оптически отрицательные одноосные кристаллы ($n_o = 2.31$, $n_e = 2.29$), которые имеют пять отличных от нуля компонент тензора электрооптических коэффициентов:

$$\begin{aligned} r_{13} = r_{23} &\approx 7 \cdot 10^{-9} \text{ см/В}, \quad r_{33} \approx 13 \cdot 10^{-8} \text{ см/В}, \\ r_{42} = r_{51} &\approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ см/В}. \end{aligned} \quad (10)$$

Если электрическое поле \mathbf{E} направлено вдоль оптической оси z , то уравнение оптической индикатриссы кристалла принимает вид [8]

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right) y^2 \\ + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right) z^2 = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Поскольку $r_{33} \gg r_{13}, r_{42}$, эффективность дефлектора будет максимальной в том случае, когда излучение распространяется в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла, и поляризовано вдоль этой оси. Схема установки дефлектора внутри резонатора приведена на рис.2: оптическая ось кристалла z направлена перпендикулярно плоскости рисунка, оптимальные направления векторов \mathbf{k} , \mathbf{E} , \mathbf{H} электромагнитного поля показаны сплошными стрелками.

Уравнение (11) позволяет определить зависимость показателя преломления дефлектора от приложенного напряжения. Для конфигурации дефлектора, показанной на рис.2, получим

$$n(U) = n_o \left(1 - \frac{r_{13} n_o^2}{2d} U \right) \text{ для волны ТМ-поляризации,} \quad (12)$$

$$n(U) = n_e \left(1 - \frac{r_{33} n_e^2}{2d} U \right) \text{ для волны ТЕ-поляризации,}$$

где U – приложенное напряжение; d – расстояние между электродами. Подставляя выражения (12) в (9), получаем зависимость изменения частоты излучения лазера от напряжения на дефлекторе:

$$\begin{aligned} \delta \nu_{\text{ТЕ}} &= \frac{c}{A} \frac{\cos \varphi}{(\sin \varphi + \sin \theta)^2} \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}} \frac{r_{33} n_e^2}{2d} \delta U, \\ \delta \nu_{\text{ТМ}} &= \delta \nu_{\text{ТЕ}} \frac{r_{13} n_o^3}{r_{33} n_e^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для стандартных значений параметров резонатора и приведенных выше значений электрооптических коэффициентов для кристалла SBN при $d = 0.3$ см получим

$$\frac{\delta \nu_{\text{ТЕ}}}{\delta U} \approx 0.2 \text{ ГГц/В}, \quad \frac{\delta \nu_{\text{ТМ}}}{\delta U} \approx 10.5 \text{ МГц/В}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что изменение напряжения на 500 В приведет в оптимальном случае к перестройке частоты лазера на 100 ГГц (3 см^{-1}), что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

Экспериментальная установка для проверки работы электрооптического дефлектора была создана на базе одночастотного импульсного лазера на красителе, описанного в [9]. Лазер построен на основе GIG-резонатора с продольной накачкой, оптическая длина резонатора составляла 6 см (межмодовый интервал 2.5 ГГц). В качестве источника накачки применялся лазер на парах меди, транспортировка излучения накачки к активной зоне осуществлялась по многомодовому оптическому волокну. Средняя мощность накачки была равна 2 Вт при длительности импульса 5 нс и частоте следования импульсов 10 кГц. В качестве активной среды лазера использовался спиртовой раствор красителя РН-45.

Вместо «стандартного» зеркала 2 (см. рис.1) в лазерном резонаторе был установлен электрооптический дефлектор 4 (см. рис.2). Электрооптический дефлектор был изготовлен из кристалла SBN, выращенного по методике, разработанной в ИОФ РАН [10]. Дефлектор имел размеры $16 \times 3 \times 4$ мм, угол при вершине призмы составлял 7° . На заднюю грань призмы было нанесено многослойное диэлектрическое зеркало, имеющее максимальный коэффициент отражения в диапазоне 550–600 нм, передняя грань призмы была просветлена. На боковые грани призмы наносились графитовые электроды. После нанесения покрытий кристалл был монодоменизирован. Для питания дефлектора применялся высоковольтный источник со ступенчатой регулировкой напряжения в пределах 0.2–2 кВ, плавная регулировка напряжения могла осуществляться в пределах 200 В. Для измерения спектральных характеристик лазерного излучения использовался измеритель длин волн LM01, энергетические характеристики лазера регистрировались с помощью измерителя мощности ИМО-2Н.

Перед установкой в лазерный резонатор были проведены измерения лучевой прочности кристалла SBN. Эксперименты показали, что кристалл выдерживает лучевую нагрузку до 30 кВт/см^2 при $\lambda = 550 - 600$ нм, что в несколько раз больше значений, обычно достигаемых в GIG-резонаторе.

На рис.3 показан спектр излучения лазера с электрооптическим дефлектором, полученный с помощью интерферометра Физо и записанный ПЗС-линейкой. Видно, что лазер работает в одночастотном режиме, ширина контура генерации не превышает 600 МГц (т. е. ширины аппаратной функции интерферометра). Средняя мощность лазерной генерации составляла 50–100 мВт. Результаты экспериментов по электронному сканирова-

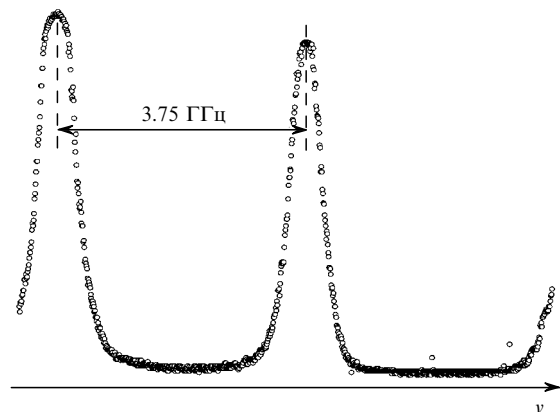


Рис.3. Спектр излучения лазера на красителе.

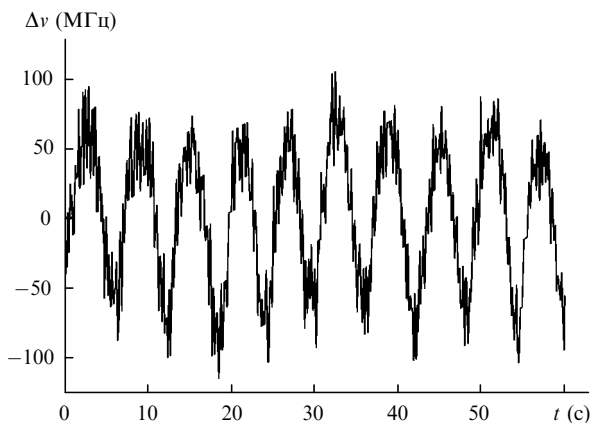


Рис.4. Зависимость отстройки частоты излучения лазера $\Delta\nu$ от начальной частоты ν_0 от времени t при плавной регулировке напряжения в диапазоне $U = 500 \pm 100$ В.

нию частоты лазера при плавной и ступенчатой регулировке напряжения приведены на рис.4 и 5 соответственно. Видно, что «скорость» перестройки частоты с помощью электрооптического узла сканирования составляет примерно 1 МГц/В, при этом зависимость частоты лазера от напряжения, поданного на дефлектор, является линейной и гистерезисные явления отсутствуют.

Поляризация излучения лазера с GIG-резонатором определяется свойствами дифракционной решетки. В резонаторе лазера была установлена стандартная дифракционная решетка с металлическим покрытием. Такие решетки имеют высокую эффективность для ТМ-поляризации, и поэтому излучение лазера имело ТМ-поляризацию, тогда как электрооптический эффект в кристалле SBN максимален для ТЕ-поляризации. Продemonстрированный экспериментально диапазон сканирования частоты лазера заметно отличается от расчетного. Такое различие мы связываем с нагревом кристалла SBN при генерации излучения с $\lambda \sim 590$ нм и средней мощностью $P_{\text{out}} \approx 0.1$ Вт, который порождает деполяризующие процессы, приводящие к уменьшению электрооптических коэффициентов для кристалла. Известно, что монокристаллы SBN являются релаксорными сегнетоэлектриками с размытым фазовым переходом, наиболее ярко выраженным для кристаллов SBN-75 ($x = 0.75$) при температуре 30–50 °С. Для этих кристаллов вероятность деполяризующих процессов возрастает даже при незначительном перегреве, что, по-видимому, имело место в наших экспериментах.

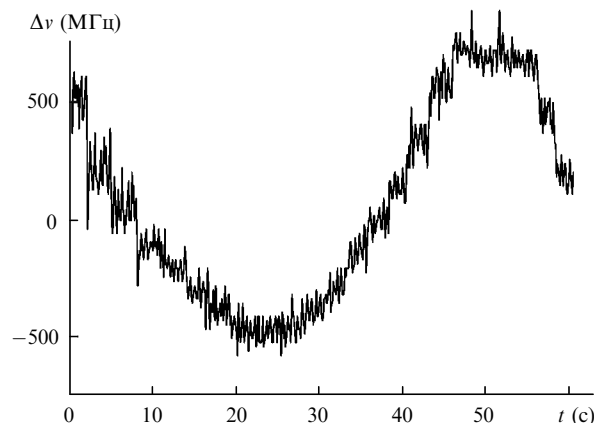


Рис.5. Зависимость отстройки частоты излучения лазера $\Delta\nu$ от начальной частоты ν_0 от времени t при ступенчатой регулировке напряжения в диапазоне $U = 200 - 1000$ В.

В дальнейшем представляется более перспективным использование в электрооптическом дефлекторе кристаллов SBN-61 конгруэнтного состава. Оптические параметры этих кристаллов могут быть модифицированы для конкретной задачи путем введения легирующих примесей при сохранении высокой оптической однородности материала.

В заключение авторы благодарят Н.М.Полозкова и П.А.Лыкова за помощь при проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Интеграция» (проект № А0103/99).

1. Shoshan I., Danon N.N., Oppenheim U.P. *J.Appl.Phys.*, **48**, 4495 (1977).
2. Littman M.G., Metcalf H.J. *Appl.Optics*, **17**, 2224 (1978).
3. Liu K., Littman M.G. *Optics Letts*, **6**, 117 (1981).
4. Greenhalgh D.A., Sarkies P.H. *Appl.Optics*, **11**, 895 (1982).
5. Кострица С.А., Мишин В.А. *Квантовая электроника*, **21**, 502 (1994).
6. Васильев С.В., Кострица С.А., Мишин В.А. *ЖТФ*, **67**, № 3, 53 (1997).
7. Prokhorov A.M., Kuzminov Yu.S. *Ferroelectric crystals for laser radiation control* (Bristol, Philadelphia, New York, The Adam Hilger Series on Optics and Optoelectronics, 1991, p.81).
8. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Методы модуляции и сканирования света* (М., Наука, 1979, с. 73).
9. Васильев С.В., Мишин В.А., Шаврова Т.В. *Квантовая электроника*, **24**, 131 (1997).
10. Ivleva L.I., Bogodaev N.V., Polozkov N.M., Osiko V.V. *Optical Materials*, **4**, 168 (1995).
11. Васильев С.В., Сычугов В.А. *Квантовая электроника*, **31**, 72 (2001).