

07;12

Исследование узла перестройки частоты одномодового лазера на красителе с решеткой в скользящем падении

© С.В. Васильев, С.А. Кострица, В.А. Мишин

Институт общей физики РАН,
117942 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 9 октября 1995 г.)

Методами численного моделирования исследован и оптимизирован механизм сканирования частоты одномодового лазера на красителе со скользящим падением излучения на дифракционную решетку. Механизм перестройки основан на использовании стеклянного клина (оптического редуктора), помещенного в резонатор лазера. Показано, что при использовании резонатора со специально подобранными параметрами можно избежать перескока продольной моды при сканировании частоты лазера в широком диапазоне.

Введение

В настоящий момент активно исследуется схема импульсного узкополосного лазера на красителе, предложенная Литтманом и Меткаффом [1] (рис. 1). Особенностью этой схемы является использование резонатора с дифракционной решеткой, установленной под углом $\Theta = 88-89.5^\circ$ к лазерному пучку (резонатор GIG-типа). Такая геометрия резонатора позволяет облучить апертуру решетки (2–5 см) без использования расширителя пучка и, следовательно, уменьшить его длину до 5–10 см. Таким образом, высокая селективность и большой межмодовый интервал резонатора обеспечивают стабильную работу лазера в одночастотном режиме при предельной простоте конструкции. В настоящее время многие исследовательские группы интенсивно разрабатывают GIG лазеры с различными активными средами и системами накачки [1–3].

Обычно перестройка частоты GIG лазера осуществляется поворотом зеркала $M1$ (рис. 1). Для плавного сканирования частоты в одномодовом режиме необходимо одновременно с поворотом зеркала $M1$ изменять оптическую длину резонатора так, чтобы не менялся индекс его продольной моды. В работе [4] показано, что при определенном выборе положения оси вращения зеркала $M1$ дисперсионный контур решетки и собственная частота резонатора изменяются синхронно при сканировании лазера и, таким образом, соблюдается условие плавности перестройки. Основными трудностями, возникающими при практической реализации этой схемы резонатора, являются, во-первых, высокая скорость перестройки частоты, поэтому необходимо использовать кинематические элементы, обеспечивающие угловое разрешение не хуже $0.1''$, во-вторых, для плавного сканирования одномодового лазера в широком диапазоне требуется очень точная юстировка узла перестройки. Поэтому, несмотря на успехи, достигнутые при решении проблем, связанных с плавной перестройкой одномодо-

вых GIG лазеров [4], дальнейшее совершенствование механизма сканирования представляет практический интерес.

В этой связи интересным и заслуживающим внимания является предложение использовать оптический редуктор для сканирования частоты одномодового GIG лазера [5]. В этой работе показано, что, используя стеклянный клин, расположенный между зеркалом $M1$ и решеткой G (рис. 1), можно сканировать частоту лазера без перескока моды. При этом скорость сканирования может быть существенно уменьшена, что понижает требования к точности механизма перестройки. Однако в работе [5] лишь теоретически обоснована идея применения редуктора в одномодовом GIG лазере, но не приведено достаточно полное исследование его возможностей. Мы использовали компьютерное моделирование системы резонатор–редуктор в приближении геометрической оптики для выяснения основных особенностей функционирования и оптимизации ее параметров.

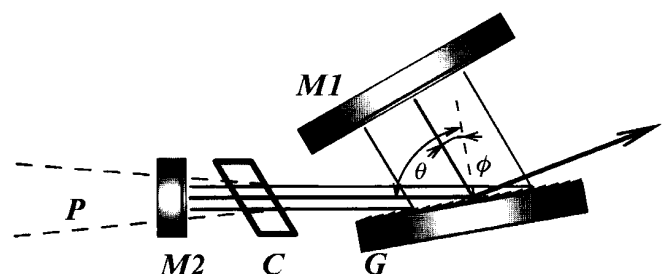


Рис. 1. Схема лазера на красителе с GIG резонатором. $M1$ — перестроечное зеркало, $M2$ — дихроичное зеркало, G — дифракционная решетка, C — кювета с красителем, P — пучок лазера накачки, θ — угол падения излучения на решетку, ϕ — угол дифракции излучения на резонансной длине волны (см. соотношение (2)). Вывод излучения через зеркальный порядок решетки.

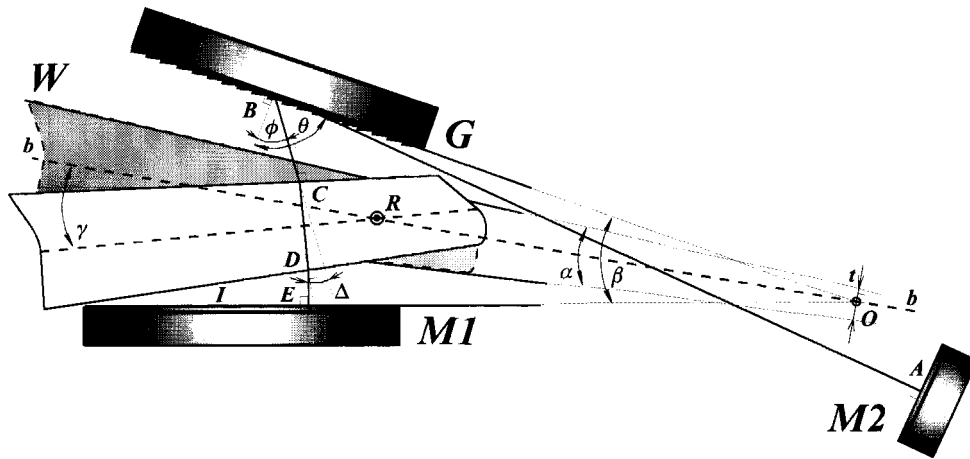


Рис. 2. Схема GIG резонатора с оптическим редуктором. $M1$, $M2$ — зеркала; G — дифракционная решетка; W — оптический редуктор (стеклянный клин с углом при вершине α , нейтральное положение отмечено штриховой линией); β — угол между решеткой G и зеркалом $M1$; R — точка, через которую проходит ось вращения редуктора; γ — угол отклонения клина от нейтрального положения; θ — угол падения излучения на решетку; ϕ — угол дифракции; $ABCDE$ — путь лазерного пучка; Δ — угол на который отклоняется пучок пройдя клин; b — биссектриса угла IOB ; t — толщина клина в точке O .

Описание механизма сканирования и методика расчетов

Схема резонатора с оптическим редуктором показана на рис. 2. За нейтральное положение клина принята такая его позиция, когда биссектрисы клина W и угла IOB , составленного зеркалом $M1$ и решеткой G (на рисунке она обозначена буквой b), совпадают.

При сканировании частоты зеркало $M1$ остается неподвижным и определяет "грубую" настройку лазера, а плавная перестройка частоты лазера ν осуществляется поворотом клина, т. е. изменением угла γ . Таким образом, $\beta = \text{const}$, $\nu = \nu(\gamma)$. Отклонение лазерного пучка, прошедшего через клин Δ , определяется законом Снеллиуса. При этом Δ зависит только от одного параметра редуктора — угла при вершине клина α . Лучи, идущие нормально зеркалу $M1$, пройдя через клин, упадут на решетку под углом

$$\phi = \beta + \Delta. \quad (1)$$

Зная угол первого порядка дифракции ϕ , угол падения излучения на решетку θ и пользуясь известным соотношением для дифракционной решетки

$$\lambda_g = \Lambda(\sin \theta + \sin \phi), \quad (2)$$

можно получить частоту ν_g , на которую настроены решетка и скорость сканирования ($\partial \nu_g / \partial \gamma$). Здесь λ_g — длина волны, на которую настроена решетка, Λ — ее период.

Оптическая длина резонатора определяется соотношением

$$L = |AB| + |BC| + n|CD| + |DE|, \quad (3)$$

где n — показатель преломления материала клина.

Следует отметить, что если частота, на которую настроена решетка, и скорость сканирования зависят только от параметра клина α , то L зависит также от толщины клина t , положения оси его вращения R и геометрии резонатора.

При заданной конфигурации узла перестройки "продольный индекс моды", на которую настроена решетка, $q_g = 2L/\lambda_g$. Лазерная генерация будет происходить на такой длине волны λ_l , для которой продольный индекс моды резонатора q_l , будет равен ближайшему целому к q_g числу

$$\lambda_l = 2L/q_l = 2L/[q_g]. \quad (4)$$

Перестройку длины волны лазера можно считать плавной, если при сканировании частоты дисперсионный контур решетки и сетка собственных частот резонатора передвигаются по шкале частот с одинаковой скоростью. В качестве критерия, по которому можно определить диапазон углов поворота клина (γ' , γ''), в котором перестройка лазера будет плавной, был выбран следующий. Можно считать, что перескока моды при сканировании частоты лазера поворотом клина происходить не будет, если отстройка частоты, на которой работает решетка, от собственной частоты резонатора не превысит половины межмодового интервала резонатора при повороте клина во всем диапазоне от γ' до γ'' . Частотный интервал плавной перестройки F и средняя скорость сканирования S определялись из соотношений

$$\begin{aligned} F &= \max\{|\nu_l(\gamma_1) - \nu_l(\gamma_2)|\}, \\ \gamma_1, \gamma_2 &\in (\gamma', \gamma''); \quad \gamma_1 < \gamma_2, \\ S &= F/(\gamma_1 - \gamma_2). \end{aligned} \quad (5)$$

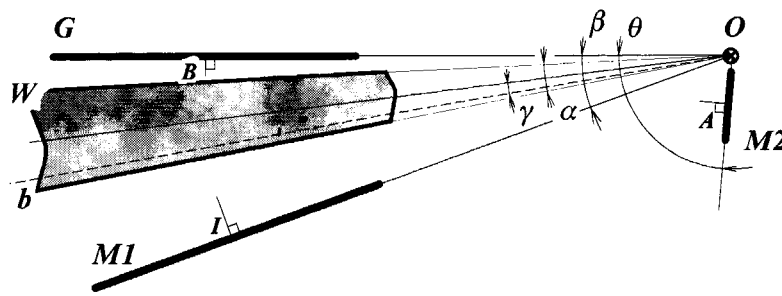


Рис. 3. Оптимальная схема системы резонатор-редуктор. $M1, M2$ — зеркала; G — дифракционная решетка; W — оптический редуктор (стеклянный клин с углом при вершине α); O — точка, через которую проходит прямая, вдоль которой пересекаются плоскости зеркал, решетки и граней клина (через точку O проходят также оси вращения зеркал $M1$ и клина W). Грубая перестройка частоты осуществляется поворотом зеркала $\lambda_{\text{crude}} = \lambda(\beta)$, а плавное сканирование — клином $\lambda_{\text{fine}} = \lambda(\gamma)$.

Обозначим абсолютное изменение "продольного индекса моды" решетки (см. (4)), или, другими словами, число скачков моды, при повороте клина во всем допустимом апертурными решетки G и зеркала $M1$ диапазоне углов через Q . Q является функцией четырех параметров клина $w = (\alpha, t, \mathbf{R})$ и двух параметров резонатора $\xi = (|AB|, |BI|)$, и задачу оптимизации редуктора можно свести к математической задаче определения минимума функции нескольких переменных $Q = Q(w, \xi)$. При этом в минимуме должно соблюдаться условие плавности сканирования $Q_{\text{min}} < 1$, а параметры клина и резонатора должны оставаться в рамках, границы которых определяются из практических соображений.

Нами были проведены исследование и оптимизация узла перестройки для короткорезонаторного лазера на красителе с решеткой в схеме скользящего падения, имеющего следующие характеристики (рис. 2): $ABI \approx 70$ мм, $\theta = 88^\circ$, решетка 2400 линий/мм, $\lambda \approx 560-580$ нм ($\beta \approx 20-23^\circ$), апертуры зеркала $M1$ и решетки G 30 мм.

Результаты численного эксперимента

На первом этапе исследования параметры резонатора фиксировались, т.е. $\xi = \text{const}$. Исследование функции четырех переменных $Q = Q(w)$ на минимум проводилось с помощью ЭВМ. Расчеты показали, что наиболее важным требованием к параметрам редуктора $w = (\alpha, t, \mathbf{R})$ является расположение оси его вращения \mathbf{R} . Плавная перестройка лазера возможна только в том случае, если ось вращения клина лежит на биссектрисе b угла IOB между решеткой G и зеркалом $M1$ (рис. 2). При этом для каждого положения оси вращения \mathbf{R} существует множество равноценных в смысле величины Q пар толщина-угол при вершине клина, которые связаны линейной зависимостью $t = k\alpha$ с коэффициентом $k = k(\mathbf{R})$,

$\mathbf{R} \in b$. Таким образом, при выборе клина для резонатора с заданной геометрией два его параметра (первый — одна из координат оси вращения, второй — угол при вершине клина или его толщина) являются свободными, а два других определяются с помощью численной оптимизации. Точность, с которой требуется подбирать параметры редуктора, в основном зависит от длины резонатора (величины межмодового интервала) и для резонатора длиной 5–10 см ($\delta\nu \approx 3-1.5$ ГГц) составляет $\Delta\alpha \approx 0.1^\circ$, $\Delta t \approx 0.1$ мм, $\Delta|\mathbf{R}| \approx 0.1$ мм. Диапазон плавного сканирования с помощью оптимизированного редуктора зависит от угла при вершине клина и для приведенных выше параметров резонатора может составлять 100–1500 ГГц при скорости сканирования 10–200 ГГц/град.

Установка оптимизированного редуктора в резонатор с заданными параметрами целесообразна только в том случае, если нет необходимости в "грубой" перестройке частоты лазера с помощью зеркала $M1$

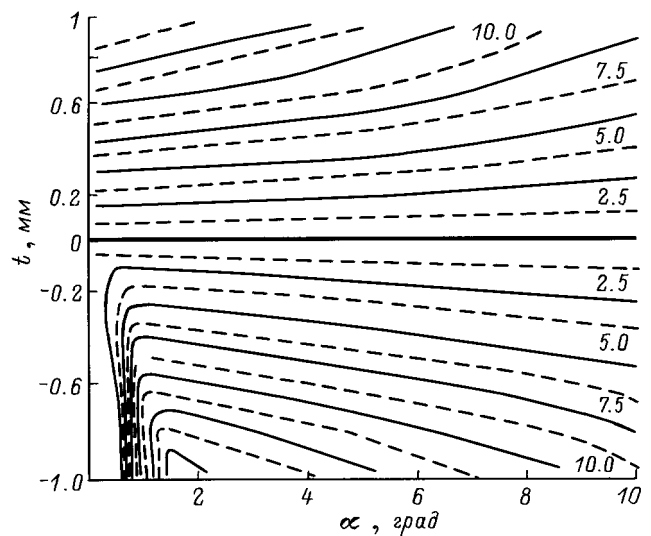


Рис. 4. Карта уровней поверхности $Q(\alpha, t, \mathbf{R})$ при $\mathbf{R} = \text{const}$ (\mathbf{R} совпадает с точкой O на рис. 3).

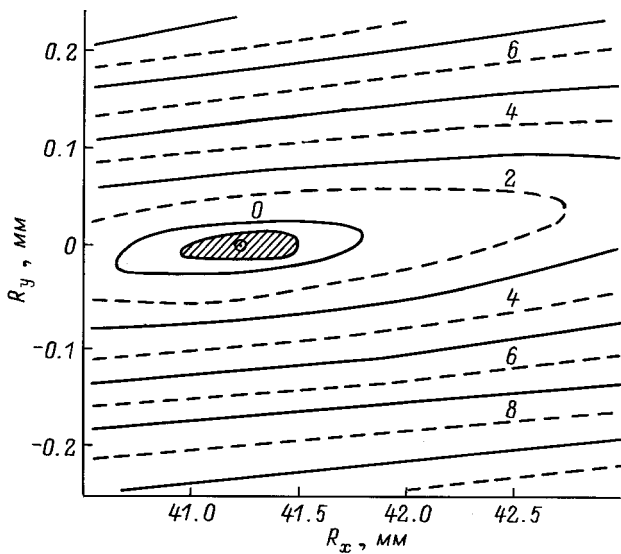


Рис. 5. Карта уровней поверхности $Q(\alpha, t, \mathbf{R})$ при $\alpha = \text{const} = 5^\circ$, $t = \text{const} = 0$ вблизи оптимального положения оси вращения O .

(рис. 2). Так как при изменении конфигурации резонатора положение редуктора перестает быть оптимальным, то для того, чтобы плавное сканирование снова стало возможным, требуется переюстировка узла перестройки.

Этот недостаток удается устранить в GIG резонаторе со специальной геометрией, схема которого показана на рис. 3. Можно сказать, что этот резонатор является дальнейшим развитием системы, предложенной в работе [4]. Его особенностью является то, что плоскости зеркал $M1$, $M2$ и решетки G , а также плоскости, образующие грани клина W , пересекаются вдоль общей прямой, проекция которой на плоскость рисунка обозначена буквой O . Оси вращения клина и зеркала $M1$ также проходят через точку O . Таким образом, параметры резонатора оказываются жестко связанными, исчезает произвол в выборе оси вращения и толщины клина (в данном случае $t = 0$). Эти требования иллюстрирует рис. 4, на котором представлена карта уровней поверхности $Q = Q(\alpha, t, \mathbf{R} = \text{const})$, \mathbf{R} совпадает с точкой O на рис. 3. Из рисунка видно, что эта поверхность представляет собой "каньон", дно которого есть прямая $t = 0$ (обозначена жирной линией на рисунке). На этой прямой $Q = 0$. При $t = 0$ производная $(\partial Q / \partial \alpha) = 0$, а $(\partial Q / \partial t)$ испытывает скачок примерно от минус до плюс 20 мм^{-1} . Отсюда следует, что в системе резонатор-редуктор (рис. 3) при вращении клина происходит полная синхронизация скоростей движения дисперсионного контура решетки и сетки собственных частот резонатора при любом угле при вершине клина, таком что $\alpha < \beta$. Более того, поворот зеркала $M1$ вокруг точки O не приводит к рассогласо-

ванию системы. Таким образом, предложенная схема резонатора позволяет реализовать как возможность грубой перестройки частоты поворотом зеркала $M1$, так и плавное сканирование клином.

На рис. 5 показана карта уровней поверхности $Q = Q(\alpha = \text{const}, t = 0, \mathbf{R})$ вблизи оптимального положения оси вращения O . Ось Ox направлена вдоль плоскости зеркала $M1$ в сторону зеркала $M2$. С помощью рис. 5 можно оценить влияние отклонения положения оси вращения редуктора от идеального на диапазон плавной перестройки. Из рис. 5 видно, что, для того чтобы условие плавного сканирования ($Q < 1$) соблюдалось, ось вращения должна лежать в области размером 0.02 на 0.5 мм. Таким образом, практическая реализация рассмотренной системы вполне возможна.

Зависимость ширины диапазона и скорости плавного сканирования от угла при вершине клина приведена на рис. 6 (угол β при этом был равен 20°). Рисунок и расчеты, проведенные для других значений β , показывают, что оптимальным с точки зрения ширины диапазона плавного сканирования является угол α , равный примерно половине β . Это можно объяснить тем, что, с одной стороны, скорость перестройки растет с увеличением угла при вершине клина, с другой — увеличение α ограничивает область перемещения клина в пространстве между зеркалом $M1$ и решеткой G . С практической точки зрения угол α должен выбираться так, чтобы скорость сканирования была согласована с точностью поворотного устройства и требуемым диапазоном перестройки.

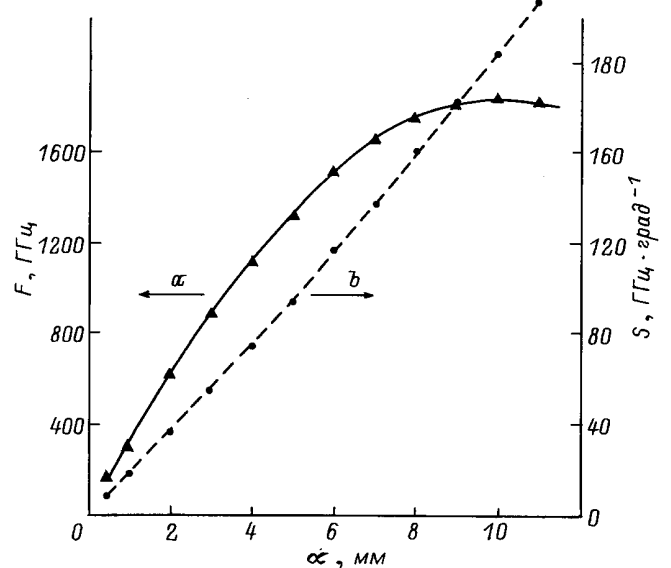


Рис. 6. Зависимости ширины диапазона и средней скорости сканирования частоты от угла при вершине клина. a — диапазон плавного сканирования F , b — средняя скорость сканирования S .

Заключение

На основании полученных результатов можно заключить, что при сканировании частоты короткореzonаторного одномодового лазера с решеткой, установленной с схеме скользящего падения, с помощью оптического редуктора (стеклянного клина) при специальном выборе параметров редуктора возможна плавная перестройка лазера без перескока моды. Предложенная специальная геометрия системы резонатор–редуктор, позволяющая реализовать как грубое сканирование частоты лазера в широком диапазоне со скоростью 10^4 ГГц/град поворотом зеркала, так и точную перестройку клином ($\partial\nu/\partial\gamma \cong 10^2$ ГГц/град. Получены оценки точности, с которой следует подбирать параметры резонатора и редуктора.

В заключение авторы благодарят сотрудников Лаборатории атомной спектроскопии Отдела кинетики ИОФ РАН за полезные дискуссии и поддержку этой работы.

Список литературы

- [1] *Littman M.G., Metcalf H.J.* // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. P. 2224–2227.
- [2] *Littman M.G.* // Appl. Opt. 1984. Vol. 23. P. 4465–4468.
- [3] *McKinnie T., Berry A.J., King T.A.* // J. of Mod. Opt. 1991. Vol. 38. P. 1691–1701.
- [4] *Liu K., Littman M.G.* // Opt. Lett. 1981. Vol. 6. P. 117–118.
- [5] *Kostritsa S.A., Mishin V.A.* // Quant. Electron. Vol. 24. N 5. P. 464–466.