

07

КОМБИНИРОВАННАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД Ar^+ ЛАЗЕРА

А. А. Ангелуц, Д. П. Криндач, В. И. Новодережкин

В применении к одному и тому же Ar^+ лазеру осуществлена синхронизация мод с использованием акустооптического модулятора, насыщающегося поглотителя или их одновременного действия. Показано, что длительность и энергия импульсов определяются не выбором метода синхронизации мод, а достигаемой плотностью энергии импульсов в усилителе. Последняя же ограничивается реализуемой глубиной модуляции потерь. Возможной альтернативой увеличению глубины модуляции предлагается комбинированный метод синхронизации мод, одним из достоинств которого является резкое снижение требований к стабильности действия акустооптического модулятора.

Использование Ar^+ лазера с синхронизацией мод в качестве источника синхронного возбуждения лазеров на красителе ставит задачу повышения энергии его импульсов при возможном сокращении их длительности и стабилизации характеристик излучения. Обычно режим синхронизации мод достигается модуляцией потерь Ar^+ лазера активным методом (АСМ) — с помощью внутррезонаторного модулятора [1] либо пассивным (ПСМ) — с использованием насыщающегося поглотителя [2]. В настоящей работе сопоставляются оба метода и рассматриваются возможности, предоставляемые одновременным действием акустооптического модулятора и насыщающегося поглотителя (режим комбинированной синхронизации мод (КСМ)).

В опытах использовался Ar^+ лазер ($\lambda=488$ нм) с длиной резонатора $L \sim 4$ м (рис. 1). Середина усиливающего элемента (трубка ГЛ-301 с диаметром капилляра 4,5 мм) находилась на $1/6L$ от выходного зеркала ($R_1=5$ м, $r_1=0.85$); середина поглощающего (газоразрядная трубка типа ГЛ-301, но более короткая и с большим давлением аргона) — на расстоянии $1/3L$ от глухого зеркала ($R_2=\infty$, $r_2 \simeq 1$). Такой лазер в режиме ПСМ мог генерировать три импульса на периоде $T_0=2L/c$ с интервалом $T=9.6$ нс ($f=105$ МГц), встречавшихся попарно в середине поглотителя. Акустооптический модулятор МЛ-202 располагался во второй точке встречи импульсов (рис. 1). Его питание осуществлялось генератором Г-3-19А без специальной стабилизации частоты. Собственные потери резонатора за обход составили $K_{\text{пот}}=0.2 \gg \ln(1/r_1 r_2)$.

Длительность импульсов τ измеряли с помощью фотохронографа АГАТ СФ-1 и по ширине спектра генерации, полагая $\tau=0.441/\Delta f_{\text{ген}}$. Точность измерения абсолютных значений τ была не хуже 0.15. Относительные флуктуации τ при пассивном и комбинированном методах были существенно меньше этой величины, а при активном оказались ~ 0.3 из-за нестабильностей в работе модулятора.

Изменение потерь при действии модулятора (режим АСМ) есть

$$K_{\text{пот}} + K_{\text{м. пот}}(t), \text{ где } K_{\text{м. пот}}(t) = K_{\text{м}}(1 + \sin 2\pi f_{\text{м}} t), \quad (1)$$

$K_{\text{м}}$ — амплитуда модуляции потерь за обход резонатора, связанная с коэффициентом модуляции $\rho = P_{\text{диф}}/P_0$ соотношением $1 - e^{-K_{\text{м}}} \simeq 2\rho$ ($P_{\text{диф}}$ — диффразированная мощность, P_0 — падающая). Техническим пределом данного модулятора было $\rho_{\text{max}}=0.14$ и, следовательно, $K_{\text{м}} \leq 0.3$.

В режиме ПСМ поглотитель насыщается проходящим импульсом, затем восстанавливается и потери резонатора меняются от $K_{\text{пот}} + Ke^{-S\mu}$ до $K_{\text{пот}} + K$. Здесь K — величина поглощения за обход резонатора, $S\mu$ — безразмерная плотность энергии импульса в поглотителе, $\mu \equiv \epsilon/(\hbar\omega/2\sigma)$ — то же в усилителе, ϵ — физическая плотность энергии импульса, $\sigma \sim 10^{-12}$ см² — сечение перехода, параметр $S = \alpha (A_r/A_n) = 5.4$, $\alpha \simeq 1.7$ — коэффициент встречи импульсов в поглотителе, $A_{r, n}$ — сечения пучка генерации в усилителе и в поглотителе.

Амплитуда модуляции потерь тогда есть

$$K(1 - e^{-S\mu}), \quad (2)$$

она же определяет потери энергии импульса на насыщение поглотителя

$$\Delta E_{\text{пот}} = \frac{\hbar\omega}{2\sigma} A_n K (1 - e^{-S\mu}). \quad (2a)$$

Насыщающийся поглотитель мог обеспечивать большую амплитуду модуляции, чем акустооптический модулятор, и сравнение пассивного и активного

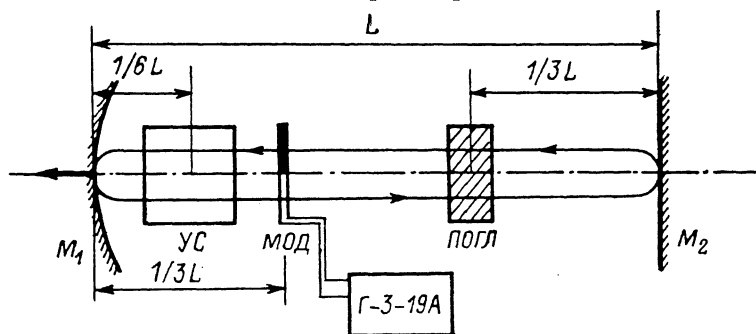


Рис. 1. Расположение элементов в резонаторе Ag^+ лазера при комбинированном методе синхронизации мод.

УС — усилитель ГЛ-301, МОД — модулятор МЛ-202, ПОГЛ — насыщающийся газоразрядный поглотитель.

методов разумно проводить при $K = K_m = 0.3$. Кроме того, при всех методах синхронизации мод происходит автомодуляция усиления, которое насыщается проходящим импульсом, а затем за время $T/2$ восстанавливается

$$G_n = Ge^{-\mu} \text{ и } G_0 = G_0 - (G_0 - G_n)e^{-T/2T_T}, \quad (3)$$

где G — усиление, встречаемое импульсом при обходе резонатора; $G_0 \equiv (1 - e^{-\mu} e^{-T/2T_T}) / (1 - e^{-T/2T_T})$ — усиление в отсутствие генерации; $T_T = 5$ нс — время релаксации усиления [3]; T — интервал между импульсами в излучении.

Насыщение усиления является энергетическим источником генерации, и значения G и μ в (3) не независимы; в стационарном режиме их связь легко рассчитать из энергетического баланса импульса при обходе резонатора.

С учетом протяженности усиливающей и поглощающей сред плотность энергии импульса на выходе усилителя $\mu_{\text{вых}}$ связана с плотностью энергии на входе $\mu_{\text{вх}}$ соотношением

$$\mu_{\text{вых}} = \ln [1 + (e^{\mu_{\text{вх}}} - 1) e^{G/2}]. \quad (4)$$

Аналогично для поглотителя

$$(S\mu)_{\text{вых}} = \ln [1 + (e^{(S\mu)_{\text{вх}}} - 1) e^{-K/2}]. \quad (4a)$$

При прохождении импульсом модулятора полагали, что изменения его энергии не происходит.¹ Учет диссипативных потерь и потерь на излучение тривиален.

¹ Утверждение справедливо, если импульс проходит модулятор в момент наименьших потерь $K_{m, \text{пот}}(t) = 0$. Это не так [1], но в наших опытах потери были незначительны.

Отметим, что, помимо точного расчета, связь $G(\mu)$ можно получить приближенно, если $\Delta\mu \equiv \mu_{\text{вых}} - \mu_{\text{вх}} \ll \mu$ [4],

$$G = \frac{\mu(1 - e^{-K_{\text{пот}}}) + \frac{K}{S}(1 - e^{-S\mu})}{1 - e^{-\mu}}. \quad (5)$$

На рис. 2 показаны расчетные зависимости $G(\mu)$, определяющие динамическую область существования режимов АСМ, ПСМ и КСМ в опытах, и требуе-

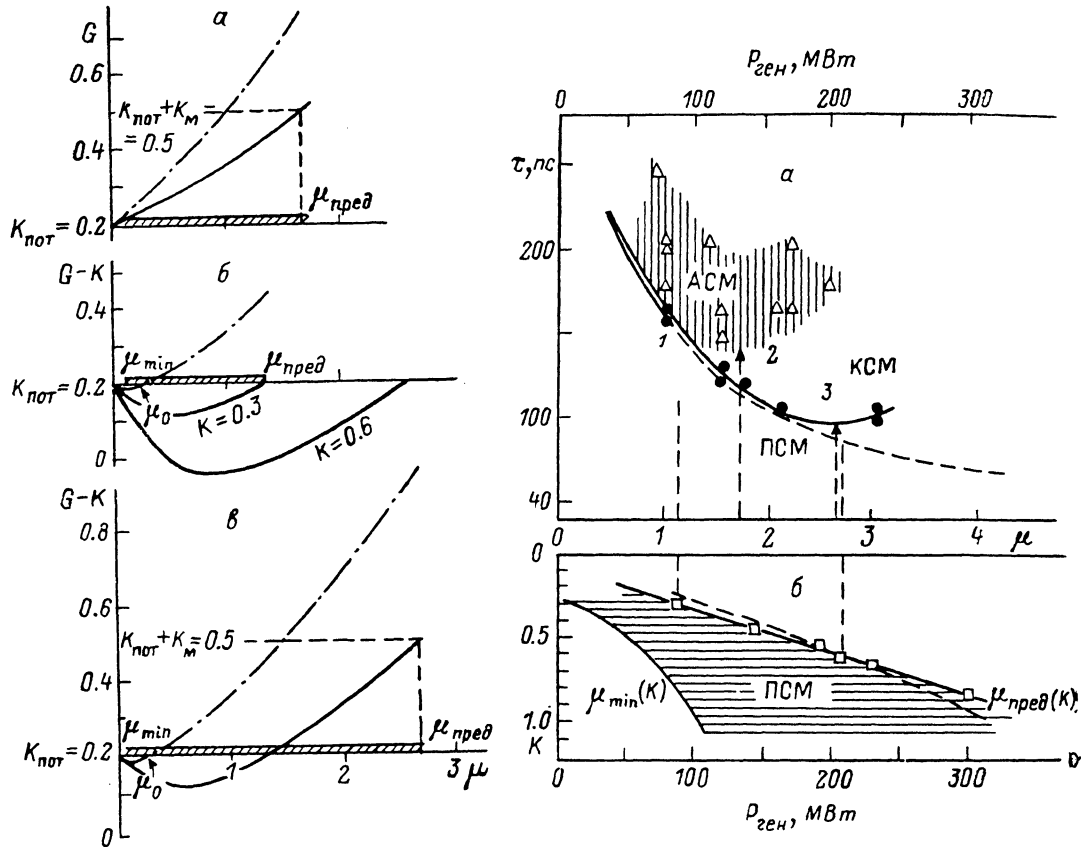


Рис. 2. Расчетные зависимости требуемых величин встречаемого импульсом усиления G (сплошные кривые) и ненасыщенного усиления G_0 (штрихпунктир) от величины безразмерной плотности энергии импульсов в усилителе $\mu = \epsilon/\hbar\omega/2\sigma$ для стационарного режима синхронизации мод Ar^+ лазера.

α — АСМ с амплитудой модуляции потерь $K_M=0.3$, β — ПСМ при величине поглощения $K=0.3$ (а также $G(\mu)$ при $K=0.6$), ν — КСМ при $K_M+K=0.6$. На оси абсцисс выделены возможные значения μ при генерации эквидистантных импульсов.

Рис. 3. Зависимости длительности импульсов τ от безразмерной плотности их энергии в усилителе μ (а) и значений μ_{min} и $\mu_{\text{пред}}$ в режиме ПСМ от величины поглощения K (б). Измеренные значения средней мощности генерации приведены для $K_{\text{пот}}=0.2$ ($\ln(1/r)=0.162$).

α — АСМ с $K_M=0.3$; ПСМ для $K=0.3$ — сплошная линия, для $0.3 \leq K \leq 1.0$ — штриховая, экспериментальные точки не указаны; КСМ при $K_M+K=0.6$; б: сплошные линии — эксперимент (точки указаны лишь для $\mu_{\text{пред}}$), штриховая линия — расчет для $\mu_{\text{пред}}$. Вертикальные и штриховые линии на графиках указывают значения $\mu_{\text{пред}}$ для ПСМ ($K=0.3$ и 0.6), АСМ ($K_M=0.3$) и КСМ ($K_M+K=0.6$).

мый уровень возбуждения лазера $G_0(\mu)$. По оси ординат отложены величины $G-K$ и G_0-K , но изменяемой величиной является усиление, а K , K_M , $K_{\text{пот}}$ и S — параметрами. Ось абсцисс проведена по уровню $G-K=K_{\text{пот}}$. Корректность расчетов можно было проверить, измерив G_0 непосредственно, а

$$\mu = \frac{P_{\text{ген}}T}{A_y} \frac{r}{1-r} \frac{2\sigma}{\hbar\omega} e^{K_{\text{пот}} - \ln\left(\frac{1}{r}\right)}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ген}}$ — средняя мощность генерации, $r \approx r_1$.

Эксперимент неизменно показывал количественное согласие с расчетом. Порогом генерации является превышение усилением уровня потерь (рис. 2)

$$\text{АСМ } G_0 \geq K_{\text{пот}}, \text{ ПСМ и КСМ } G_0 \geq K_{\text{пот}} + K. \quad (7)$$

Стартовая плотность энергии импульсов для АСМ $\mu_0 \sim 0$, а для ПСМ и КСМ сразу $\mu_0 > 0$. Уменьшение усиления от порога генерации в последнем случае приводит к пропаданию генерации при том значении $\mu_{\text{min}} < \mu_0$, при котором достигается экстремум в зависимостях $G_0(\mu)$. Это — известное явление гистерезиса.

С увеличением уровня возбуждения лазера G_0 от порога растет и плотность энергии импульсов в усилителе μ , но встречное усиление должно оставаться ниже уровня максимальных потерь

$$\begin{aligned} \text{АСМ } G &\leq K_{\text{пот}} + K_m, \\ \text{ПСМ } G &\leq K_{\text{пот}} + K, \\ \text{КСМ } G &\leq K_{\text{пот}} + K_m + K. \end{aligned} \quad (8)$$

Условия (8) через (4), (4а) или (5) определяют предельную плотность энергии импульсов в усилителе $\mu_{\text{пред}}(K, K_{\text{пот}}, K_m, S)$. Увеличить $\mu_{\text{пред}}$ можно увеличением амплитуды модуляции K_m , поглощения K и параметра S либо уменьшением потерь резонатора $K_{\text{пот}}$.

Таким образом, при фиксированных значениях $K_m, K, K_{\text{пот}}$ и S плотность энергии импульсов в усилителе в зависимости от уровня возбуждения лазера может меняться от μ_{min} до $\mu_{\text{пред}}$. При этом длительность импульсов τ , как показал эксперимент,² практически универсально определяется достигаемым значением μ для всех перечисленных режимов синхронизации мод Ar^+ лазера.

Универсальная зависимость $\tau(\mu)$ представлена штриховой линией на рис. 3, а (режим ПСМ) и получена варьированием параметров $K, K_{\text{пот}}$ или S . Рис. 3, б иллюстрирует эффект изменения величины поглощения K ; при достижении соответствующего значения $\mu_{\text{пред}}(K)$ в излучении появляются пары импульсов (импульсы-спутеллиты).

В режимах АСМ и КСМ расчетные значения $\mu_{\text{пред}}(K_m, K_{\text{пот}})$ и $\mu_{\text{пред}}(K_m, K, K_{\text{пот}}, S)$ соответственно совпадают с достижением минимальной длительности импульсов в опытах. Дальнейшее увеличение уровня возбуждения G_0 здесь не меняло структуру излучения, но режим синхронизации мод начинал разрушаться, что проявилось в увеличении τ при $\mu > \mu_{\text{пред}}$ (рис. 3, а).

В области же $\mu < \mu_{\text{пред}}$ для АСМ и КСМ значения $\tau(\mu)$ практически совпадают с универсальной зависимостью тем лучше, чем сильнее неравенство. Для КСМ и ПСМ зависимости $\tau(\mu)$ совпадают на значительном протяжении; чтобы их различить, первая проведена чуть выше второй. Для АСМ нестабильности в работе модулятора могли лишь увеличивать длительность импульсов, и потому полагали, что «истинные» значения τ лежат на нижней границе заштрихованной области.

Отметим, что в режиме КСМ действие насыщающегося поглотителя резко снижает уровень шумов, обусловленных жесткостью задания частоты модуляции f_m , легко позволяя достичь расчетных характеристик в излучении без специальных систем стабилизации.

Сравнительно небольшая мощность генерации $P_{\text{ген}} \leq 0.3$ Вт в опытах была вызвана стремлением наблюдать возможно большую часть зависимости $\tau(\mu)$. Увеличение прозрачности выходного зеркала давало $P_{\text{ген}} \sim 0.6$ Вт в режиме ПСМ, но при этом оказывалось $\tau \geq 150$ пс. Аналогичная ситуация складывалась и в режимах АСМ и КСМ. Максимальное значение μ в конечном счете лимитируется максимальным значением G_0 используемого лазера.

² Расчет τ , вообще говоря, не прост [5, 6], тем более, что в случае Ar^+ лазера полоса генерации $\Delta f_{\text{ген}}$ оказывается заметно шире полосы усиления $\Delta f_{\text{ус}}$, измеренной по уровню потерь (здесь $\Delta f_{\text{ген}} \sim 8$ ГГц, $\Delta f_{\text{ус}} \sim 4.5$ ГГц). Традиционным же приближением теоретических моделей является случай $\Delta f_{\text{ген}} \ll \Delta f_{\text{ус}}$.

Проведенные исследования показывают, что длительность и энергия импульсов Ag^+ лазера определяются в первую очередь не выбором метода синхронизации мод (разница несущественна), а значением достигаемой плотности энергии импульсов в усилителе μ , ограничиваемой величиной $\mu_{пред}$ (K_m , K , $K_{пот}$, S). Если μ остается меньше $\mu_{пред}$, то обе характеристики улучшаются с ростом μ . Увеличение потерь на излучение $K_{пот} \sim \ln(1/r)$ увеличивает энергию генерируемых импульсов, но их длительность возрастает, так как падает значение $\mu_{пред}$.

Увеличивая амплитуду модуляции можно увеличить и значение $\mu_{пред}$. Если эту задачу решать путем использования двух модуляторов в одном резонаторе, то режим комбинированной синхронизации мод, по-видимому, оптимален. В этом случае не требуется синхронизации действия активного и пассивного модуляторов и резко снижаются требования в стабильности задаваемой частоты модуляции.

В заключение авторы выражают признательность А. В. Карпиленко и В. Ю. Яроцкому за полезные обсуждения и помощь в работе.

Список литературы

- [1] Аполонский А. А. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 8. С. 1552—1557.
- [2] Гафуров Х. Г., Криндач Д. П., Яковлев А. Г. // Квантовая электрон. 1985. Т. 12. № 7. С. 1503—1510.
- [3] Гринь Л. Е., Зарослева О. С., Карталева С. С., Лебедева В. В. // Вестн. МГУ. 1987. Т. 28. № 2. С. 83—85.
- [4] Криндач Д. П., Яковлев А. Г. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 8. С. 1568—1575.
- [5] Stix M. S., Ippen E. P. // IEEE. 1983. Vol. QE-19. P. 520—524.
- [6] Ланда П. С. // Автоколебания в распределенных системах. М.: Наука, 1983. 320 с.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
физический факультет

Поступило в Редакцию
10 июня 1988 г.