

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОПРОХОДОВОГО УСИЛИТЕЛЯ В ИЗЛУЧАТЕЛЕ РЕЗОНАНСНОГО ЛИДАРА

Введение

Известно, что для зондирования атмосферы принципиальное значение имеет спектральная чистота излучения, поэтому для повышения спектральной яркости предпочтительно использовать однопроходовые усилители бегущей волны [1 – 3]. В этом случае спектральные и пространственные характеристики выходного пучка изменятся незначительно, поскольку в однопроходовых усилителях, в отличие от многопроходовых, нет накопления aberrаций. При построении излучателя лидара по схеме генератор-усилитель в условиях постоянной плотности накачки возникает проблема выбора протяженности активной среды усилителя, обеспечивающей максимальный КПД всего излучателя.

Основными задачами работы являлись выяснение факторов, влияющих на процесс усиления излучения в усилителе бегущей волны на основе органического красителя родамин 6Ж с ламповой накачкой, а также исследование влияния длины активного элемента на энергетические характеристики усилителя при условии равномерной плотности накачки. В работе использовались результаты теоретического анализа процессов усиления излучения в однопроходовом усилителе, полученные с участием автора [4].

Анализ эффективности излучателя проводился в предположении общей системы накачки для генератора и усилителя, что обеспечивает одинаковые временные характеристики световых импульсов и значений КПД накачки. При расчете коэффициента усиления предполагалось, что населенность рабочего уровня определяется мгновенными значениями мощности накачки и интенсивностей усиленного шума и усиливаемого излучения.

Временные характеристики импульсов накачки и генерации

Переход от мощности к энергии в квазистационарном приближении можно осуществить, если установить связь между коэффициентом превышения мощности накачки над пороговым значением и соответствующим приращением энергии. Часть импульса накачки, превышающая пороговую интенсивность, определяется площадью его вершины, ограниченной уровнем пороговой мощности. Поскольку типичное время жизни фотона в резонаторе при ламповой накачке приблизительно на три порядка меньше длительности импульса, использование квазистационарного подхода в данном случае оправдано. Пиковая интенсивность на входе усилителя при заданной энергии импульса E_{ex} определялась выражением

$$I_{ex}^{max} = \frac{E_{ex} \cdot \tilde{X}}{S \cdot \tau_{0,5} \cdot \int_{t_{min}}^{t_{max}} [S(t/\tau) - 1/X] d(t/\tau)}, \quad (1)$$

где $\tilde{X} = 1 - 1/X$ – относительная амплитуда импульса накачки выше порога; S – площадь поперечного сечения усиливаемого пучка; $\tau_{0,5}$ – длительность светового импульса накачки по уровню 0,5; t_{min}, t_{max} – моменты начала и окончания действия входного импульса, определяемые уровнем $1/X$.

Для расчета энергии излучения лазера необходимо задать форму светового импульса накачки. Обобщение экспериментальных результатов показывает, что форма светового импульса $S(t)$ накачки вполне удовлетворительно описывается выражением [5]:

$$S\left(\frac{t}{\tau_H}\right) = A \cdot \left(\frac{t}{\tau_H}\right)^B \cdot \exp\left(-C \cdot \frac{t}{\tau_H}\right), \quad (2)$$

где A, B, C – безразмерные коэффициенты.

Коэффициенты B и C определяют форму импульса, а коэффициент A устанавливает значение функции в максимуме, равное единице. В частности, для режимов разряда, близких к критическим (с предимпульсом), обработка экспериментальных результатов дала значения $A=12,36$; $B=1,5$; $C=2,95$. График функции $S(t)$ представлен на рис.1.

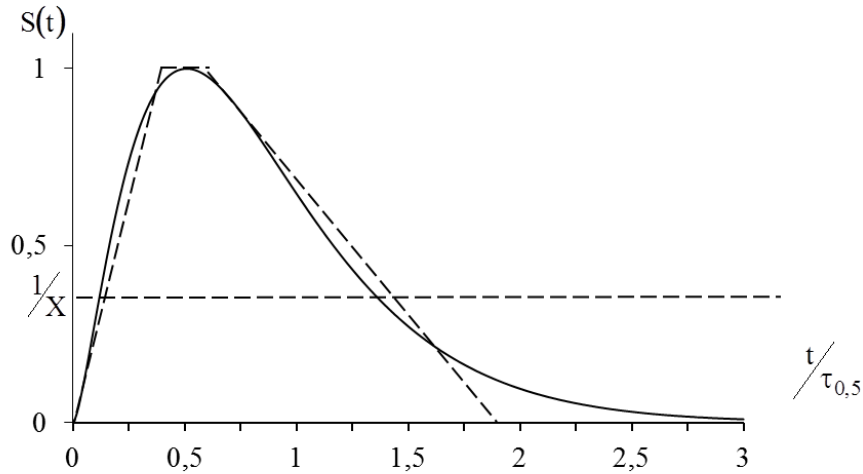


Рис. 1. Форма светового импульса накачки и ее приближение

Для упрощения процедуры расчетов форма светового импульса принималась трапециидальной с вершиной, равной $0,2\tau_{0,5}$, и основанием $1,8\tau_{0,5}$, как показано на рис.1. Импульс генерации и диапазон мощностей накачки, определяющих усиление, находятся выше уровня $1/X$. Трапециидальное приближение близко к форме реального светового импульса при $0,2 \leq 1/X \leq 0,75$. Длительность импульса на пороговом уровне $1/X$

$$\tau_x = [0,2 + 1,6 \cdot \tilde{X}] \cdot \tau_{0,5}, \quad (3)$$

где $\tilde{X} = 1 - 1/X$ – относительная амплитуда импульса накачки выше порога.

Длительность импульса генерации по произвольному уровню $k = P_2/P_2^{\max}$

$$\tau_k = [0,2 + 1,6 \cdot \tilde{X} \cdot (1-k)] \cdot \tau_{0,5}. \quad (4)$$

Уровень накачки k_H , соответствующий уровню импульса генерации k , определяется формулой

$$k_H = k + (1-k)/X. \quad (5)$$

Пиковая интенсивность и энергия излучения импульса связаны соотношением

$$I_{ex}^{\max} = \frac{E_{ex}}{S \cdot \tau_{0,5} \cdot (0,8 \cdot \tilde{X} + 0,2)}. \quad (6)$$

Для определения уровня по $0,5$ импульса генерации необходимо решить уравнение

$$0,5 \tilde{X} \cdot (1-k) \cdot (\tau_k/\tau_{0,5} + 0,2) + \tau_k \cdot k \cdot \tilde{X}/\tau_{0,5} = 0,25 \cdot \tilde{X} \cdot (\tau_x/\tau_{0,5} + 0,2). \quad (7)$$

Подставляя в уравнение выражения (3), (4) для τ_k и τ_x и решая относительно k , получим:

$$k_{0,5E} = \sqrt{0,5 + 0,125 \cdot \tilde{X}^{-1}}. \quad (8)$$

Формулы (3) – (5) дают удовлетворительное согласование порядка нескольких процентов с численными расчетами этих величин для формы импульса $S(t)$ в практически важном диапазоне $1,5 \leq X \leq 5$. Определяя по формуле (5) для рассчитанного уровня входного импульса соответствующий уровень мощности накачки, можно рассчитать приближенное значение коэффициента усиления по энергии накачки. Различие в значениях коэффициента усиления по приближенной методике и с использованием выражения (2) менее 10 % при изменении интенсивностей на входе усилителя в пределах $0,05I_s \leq I_{ex} \leq I_s$ и менее 20 % в широком диапазоне входных интенсивностей $0 < I_{ex} \leq 2I_s$ и протяженности усилителей, что вполне приемлемо для практических оценок.

Методика расчета и полученные результаты

В импульсном усилителе бегущей волны коэффициент усиления активной среды меняется в течение импульса накачки, следовательно для определения интегрального коэффициента усиления необходимо было суммировать выходные интенсивности для разных уровней накачки, превышающих уровень P_H^{\max}/X , где X – число порогов генератора. Форма импульса генерации $S(t/\tau)$ в расчетах полагалась идентичной импульсу накачки выше порогового уровня (рис.1). Пиковая интенсивность на входе усилителя при заданной энергии импульса E_{ex} определялась выражением

$$I_{ex}^{\max} = \frac{E_{ex} \cdot \tilde{X}}{S \cdot \tau_{0,5} \cdot \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} [S(t/\tau) - 1/X] d(t/\tau)}, \quad (9)$$

где S – площадь поперечного сечения усиливаемого пучка; $\tau_{0,5}$ – длительность светового импульса накачки по уровню 0,5; t_{\min}, t_{\max} – моменты начала и окончания действия входного импульса, определяемые уровнем $1/X$.

Коэффициент усиления $K(t)$ для входной интенсивности $I_{ex}(t) = A(t) \cdot I_{ex}^{\max}$ в произвольный момент времени t определялся для соответствующего этому времени значения мощности накачки:

$$P_H = A_H(t) \cdot \frac{W_H}{\tau_w}, \quad (10)$$

где $A(t)$ и $A_H(t)$ – весовые множители.

Если число интервалов разбиения $\tau_x = t_{\max} - t_{\min}$, соответствующего уровню $1/X$, равняется N , то коэффициент усиления по энергии импульса K_E можно рассчитать по формуле

$$K_E = \frac{E_{вых}}{E_{ex}} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N A^{(i)} \cdot K^{(i)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\tilde{X}} \cdot \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} S(1/\tau) d(t/\tau) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где $A^{(i)} = I_{ex}(t)/I_{ex}^{\max}$ – весовой множитель для момента времени t , соответствующего i -му интервалу.

Очевидно, что точность расчетных оценок должна расти с увеличением числа интервалов разбиения N , но увеличение N усложняет процедуру счета. Численные расчеты показали,

что вполне удовлетворительная точность счета достигается при условии $N \approx 10$. Дальнейшее увеличение числа интервалов дает уточнение в значении коэффициента усиления в пределах единиц процентов.

На рис. 2 представлены расчеты коэффициентов максимального усиления в режиме слабого сигнала ($I_{вх} \ll I_s$) в зависимости от протяженности усилителя ℓ_y . Интервал изменения длины усилителя выбирался равным 12 см, что соответствовало разрядному промежутку ламп ИСП-5000, которые использовались в экспериментальных исследованиях. Расчеты сделаны для разных значений превышения накачки над порогом в генераторе X .

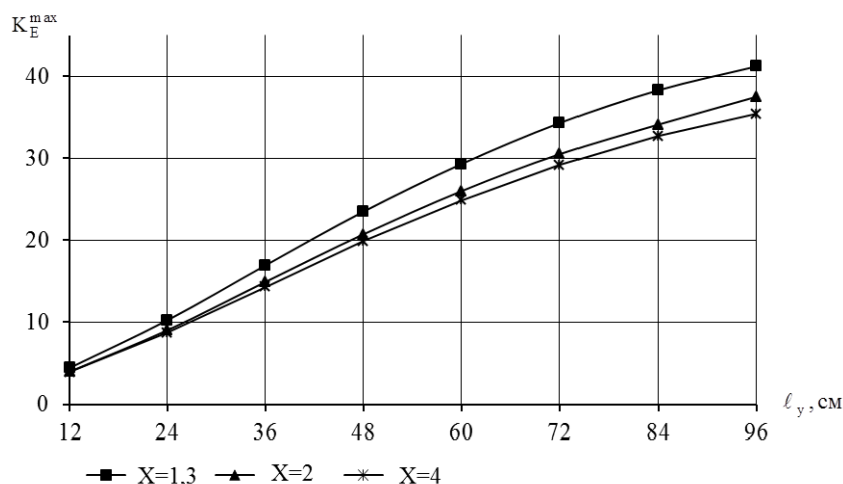


Рис. 2. Зависимости максимальных коэффициентов усиления от длины усилителя

При увеличении длины усилителя коэффициент усиления вначале изменяется почти линейно с ростом протяженности усилителя, а затем усиление замедляется. Из рисунка следует, что разница предельных коэффициентов усиления уменьшается с увеличением коэффициента превышения порога. При $X > 2$ кривые практически сливаются в одну. Снижение усиления обусловлено прежде всего нарастанием интенсивности усиленной люминесценции.

На рис. 3 представлены результаты расчета коэффициента усиления в зависимости от длины усилителя и при различных значениях входной интенсивности. Исходные данные для расчетов были аналогичны предыдущим. Превышение накачки над порогом принималось $X=2$.

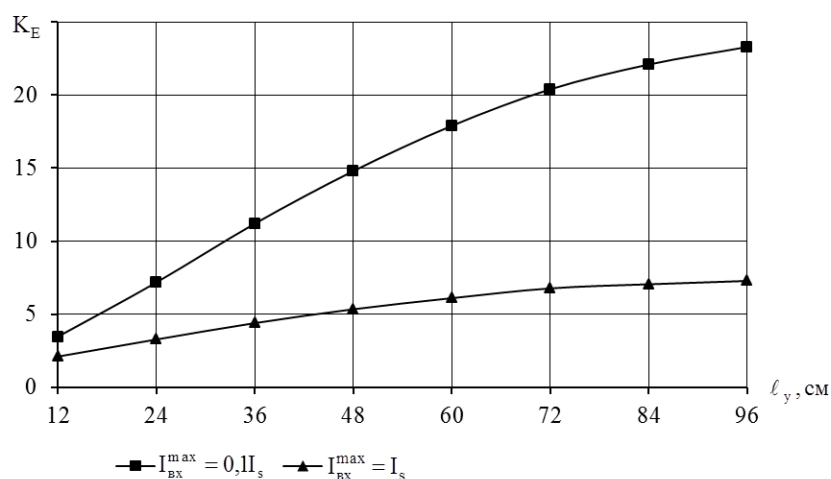


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от длины усилителя

Из рис. 3 видно, что при увеличении протяженности усилителя при любой интенсивности входной интенсивности происходит насыщение усиления. Эффект насыщения усиления

обусловлен несколькими факторами: во-первых, возрастанием интенсивности усиливаемого излучения по мере прохождения через активную среду и адекватным снижением усиления, во-вторых, нарастанием с длиной активного элемента интенсивности усиленного шума, зависящей от интегрального коэффициента усиления и, в третьих, – аналогичным влиянием усиленного рассеянного излучения. Вредное влияние двух последних факторов заключается в уменьшении населенности рабочего уровня активной среды. Сравнение расчетных результатов с учетом и без учета эффектов фокусировки излучения показало, что при указанных исходных данных влияние фокусировки излучения на коэффициент усиления уже заметно сказывается при увеличении длины усилителя свыше 500 мм.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости КПД усилителя от его длины, полученные с использованием результатов предыдущих расчетов. Из представленных зависимостей следует, что максимальный КПД усилителя достигается при длинах не более 500 мм и зависит от величины входной мощности излучения. При увеличении входных интенсивностей оптимальное значение длины активного элемента усилителя смещается в сторону меньших значений.

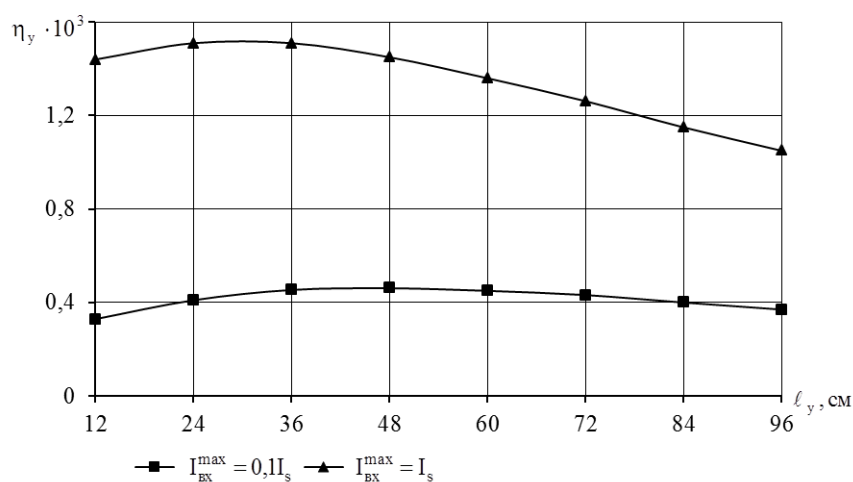


Рис. 4. Зависимость КПД усилителя от его длины

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что для сохранения достаточно высокой эффективности излучателя предельная длина усилителя не должна превышать величин порядка 500 мм. Если при этом энергия излучения оказывается недостаточной, выход из положения заключается в использовании нескольких каскадов усиления, разнесенных друг относительно друга.

Список литературы: 1. Лагутин, М.Ф., Мустецов, Н.П., Зарудный, А.А. Однокаскадный усилитель на органических красителях // Тезисы докладов 2-й Всесоюз. конф. “Лазеры на основе сложных органических соединений и их применение”. – Душанбе, 1977. – С.341-342. 2. Зарудный, А.А., Мегель, Ю.Е., Лагутин, М.Ф. Лидар для исследования мезосферной примеси // Оптика атмосферы. – 1988. – Т.1. – №6. – С.83-89. 3. Лазеры на красителях с ламповой накачкой для исследования атмосферы / Лагутин М.Ф., Зарудный А.А., Басецкий В.Л., Плетенев В.Г. // Радиотехника. – 1997. – Вып.102. – С.104-114. 4. Зарудный, А.А. Теоретический анализ повышения интенсивности излучения резонансного лидара однопроходовым усилителем // Радиотехника. – 2014. – Вып.178. – С.71-74. 5. Анохов, С.П., Марусий, Т.Я., Соскин, М.С. Перестраиваемые лазеры. – М.: Радио и связь, 1982. – 360с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.12.2016