00

Моделирование коэффициента усиления активной среды твердотельного лазерного модуля

© К.А. Галюк, Б.Д. Овчаренко, В.Х. Багдасаров, А.А. Ушаков, В.В. Букин

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

e-mail: karina2722001@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2025 г.
В окончательной редакции 12.01.2026 г.
Принята к публикации 03.06.2026 г.

Продемонстрирован метод расчета численной модели, которая описывает параметры работы лазерного модуля (квантрона) и нацелена на упрощение процесса его разработки. Модель включает в себя проектирование геометрии распространения излучения лазерных диодных решеток, расчет эффективности поглощения и пространственного распределения мощности поглощенного излучения накачки в активном элементе, оценку запасенной энергии и коэффициента усиления. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными при использовании квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой стержневого активного элемента из алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима с концентрацией 1 at.% (Nd^{3+}:YAG). Полученные расчетные и экспериментальные результаты подтверждают применимость предлагаемого метода расчета при разработке квантронов.

Ключевые слова: лазер, квантрон, поперечная диодная накачка, эффективность, запасенная энергия.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63710.16-26

Введение

Твердотельные лазеры широко применяются в различных областях науки и техники. Они играют ключевую роль в биомедицине (например, в лазерной хирургии и литотрипсии [1–3]), оборонной сфере (лазерные целеуказатели [4–5]), астрономии (лидарные системы [6–7]), обработке материалов [8–9], спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя (LIBS) [10], а также в газопоршневых двигателях [11] и системах зажигания жидкостных ракетных двигателей [12].

Сегодня существует множество модификаций твердотельных лазерных систем с различными активными элементами (АЭ), каждая из которых адаптирована под требования конкретной задачи. Квантрон — лазерный модуль, в котором осуществляется оптическая накачка АЭ. Однако для повышения технологичности разработки квантронов есть необходимость в решении проблем, связанных с увеличением эффективности использования излучения накачки, запасённой энергии и коэффициента усиления, формированием заданных пространственных распределений поглощенной мощности в АЭ. Численное моделирование на этапе проектирования изделия позволяет проводить предварительные расчеты данных параметров, варьируя различные характеристики: энергетические и спектральные параметры, геометрию излучения накачки АЭ и оптические свойства элементов. Проведение численного расчета модели значительно сокращает сроки разработки лазерных систем и уменьшает затрачиваемые производственные ресурсы.

Таким образом, целью данной работы является разработка метода построения численной модели квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой цилиндрического АЭ для повышения эффективности преобразования электрической в оптическую энергии и оптимизации его рабочих характеристик. Для верификации результатов численного моделирования проведены эксперименты. Произведено сопоставление временных форм численного и экспериментального коэффициентов усиления слабого сигнала в приосевой области АЭ.

Квантрон с поперечной диодной накачкой

В работе проводится расчет с экспериментальной верификацией параметров квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой АЭ, который разрабатывался в ИОФ РАН [13]. Оптическая принципиальная схема поперечного сечения рассматриваемой конструкции квантрона представлена на рис. 1.

В центре квантрона располагается АЭ (поз. 4) в виде цилиндрического стержня длиной 120 mm и диаметром 5 mm. Материалом АЭ является алюмоиттриевый гранат $Y_3Al_5O_{12}$ с примесными ионами неодима и концентрацией 1 at.% (Nd^{3+}:YAG). АЭ концентрично расположен внутри кварцевой трубки (поз. 2) длиной 120 mm с внешним и внутренним диаметрами 12 mm и 8 mm соответственно.

Вокруг АЭ симметрично (с угловым шагом $360^\circ/5 = 72^\circ$) размещены пять импульсных лазерных

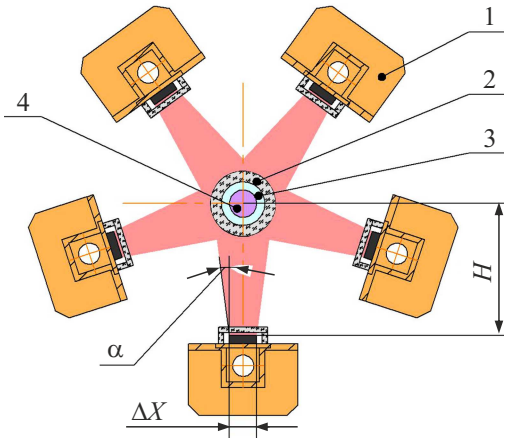


Рис. 1. Оптическая принципиальная схема квантрона (поперечное сечение) с поперечной диодной накачкой: *1* — ЛДР; *2* — кварцевая трубка; *3* — хладагент; *4* — АЭ.

диодных решеток (ЛДР) на равном расстоянии (H = 11 mm) от центра АЭ. В квантроне используются ЛДР производства компании ООО „НПП Инжект“ со следующими параметрами: размер тела свечения $\Delta x \times \Delta y = 5 \times 25$ mm, спектральный максимум на длине волны 807 ± 2 nm, расходимость лазерного излучения по медленной и быстрой осям $\alpha \leq 12.7°$ и $\beta \leq 38.2°$.

Для отвода выделяемого тепла и спектральной термостабилизации в квантроне предусмотрена жидкостная система охлаждения в виде единого замкнутого контура. Система термостабилизации обеспечивает подачу и отток хладагента при температуре 25 °C со скоростью 15 l/min.

Электрическая накачка ЛДР осуществляется с помощью источника питания FEDAL SF 315. В электрической цепи ЛДР соединены друг с другом по параллельной схеме. Импульс тока накачки источника питания имеет прямоугольную временную форму с максимальной амплитудой 225 A (45 A × 5 ЛДР), длительностью 250 μs, частотой повторения 2 Hz при падении напряжения 125 V. Суммарная оптическая мощность накачки в квантроне составляет 10 kW (2 kW × 5 ЛДР). Данные значения оптической мощности достигаются при максимальной амплитуде импульсов тока накачки ЛДР.

Численное моделирование

а) Модель оптической накачки АЭ

Одним из основных параметров работы квантрона является эффективность поглощения:

$$\eta_{ab} = P_{ab}/P_p,$$

где $P_p = 10$ kW — суммарная оптическая мощность излучения накачки (ЛДР), P_{ab} — суммарная мощность поглощенного излучения в АЭ. Для измерения P_{ab} проводится численное моделирование геометрии оптической накачки АЭ в специальном оптическом программном пакете методом непоследовательной трассировки лучей. Основные этапы и особенности построения данной модели авторами ранее описаны в статье [14]. Построение модели осуществляется согласно оптической схеме, показанной на рис. 1, и параметрам оптических элементов, описанных выше. Рассчитанное пространственное распределение мощности поглощенного излучения накачки в объеме АЭ представлено на рис. 2. Эффективность поглощения составила $\eta_{ab} \approx 77$ %. Суммарная мощность поглощенного излучения в АЭ равна $P_{ab} \approx 7.7$ kW, что соответствует энергии поглощенного излучения в АЭ ~ 1.9 J.

Оценка однородности распределения поглощенной мощности δ в поперечном сечении АЭ определялось как среднее арифметическое δ_0 однородностей по десяти разрезам поперечного сечения АЭ и составило $\delta \approx 60$ %:

$$\delta_0 = 1 - (P_{\max} - P_{\min})n/\Sigma P_n,$$

где $P_{\min}$ и $P_{\max}$ — соответственно минимальное и максимальное значения поглощенной мощности в пространственном распределении сечения рис. 2, P_n — значение мощности n-го пикселя сечения рис. 2.

В результате построения модели оптической накачки АЭ квантрона расчетное значение эффективности поглощения составило 77 % при однородности распределения поглощенной мощности в АЭ 60 %.

б) Расчет коэффициента усиления и запасенной энергии

Запасенная энергия и коэффициент усиления являются основными рабочими характеристиками квантрона. При этом коэффициент усиления находится в пропорциональной зависимости от запасенной энергии:

$$W_{st} = S \cdot \Phi_{sat} \cdot g,$$

где $S = \delta \cdot \pi d^2/4$ — площадь области однородного распределения мощности поглощенного излучения на-

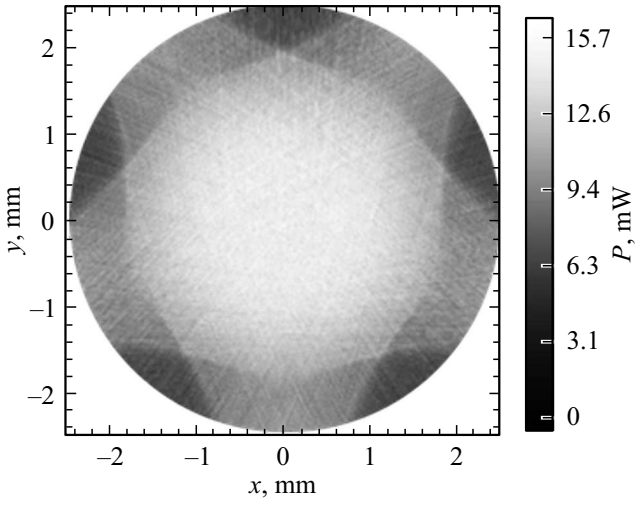


Рис. 2. Пространственное распределение мощности поглощенного излучения в поперечном сечении АЭ.

качки в поперечном сечении АЭ (d — диаметр цилиндрического АЭ), $\Phi_{sat} = 0.667\,\mathrm{J/cm^2}$ — плотность энергии насыщения при значении сечения насыщения $\sigma = 2.8 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{cm^2}$ [15], $g = \ln G$ — логарифмический коэффициент усиления. Таким образом, коэффициент усиления квантрона описывается формулой

$$G = \exp(4W_{st}/(\delta \cdot \pi d^2 \cdot \Phi_{sat})). \quad (1)$$

Мощность (изменение запасенной энергии со временем) выходного излучения

$$dW/dt = P \cdot \eta - W/\tau_l, \quad (2)$$

где P — электрическая мощность питания ЛДР, $\eta = \eta_q \cdot \eta_{LDA} \cdot \eta_{ab}$ — полная эффективность квантрона, $\eta_q = \lambda_p/\lambda_r = 808\,\mathrm{nm}/1064\,\mathrm{nm} = 76\,\%$ — квантовая эффективность в АЭ, $\lambda_p = 808\,\mathrm{nm}$ — центральная длина волны излучения ЛДР, $\lambda_r = 1064\,\mathrm{nm}$ — центральная длина волны выходного лазерного излучения, $\eta_{LDA} \approx 36\,\%$ — оптическая эффективность ЛДР (эффективность преобразования электрической энергии в оптическую), $\tau_l = 230\,\mu\mathrm{s}$ — время жизни атома на верхнем уровне в кристалле Nd^{3+}:YAG [15]. В результате преобразований и интегрирования уравнения (2) по времени получаем

$$W(t) = \tau_l \cdot P \cdot \eta - \exp(-(t + const)/\tau_l), \quad (3)$$

если $W < \tau_l \cdot P \cdot \eta$. Решая уравнение (3) при условии, что запасенная энергия в начальный момент времени равна нулю, получается значение константы

$$const = -\tau_l \cdot \ln(\tau_l \cdot P \cdot \eta). \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует выражение запасенной энергии в квантроне за время $t = \tau_p = 250\,\mu\mathrm{s}$ равное длительности импульса излучения ЛДР:

$$W_{st} = W(t = \tau_p) = \eta_q \cdot \eta_{LDA} \cdot \eta_{ab} \cdot P \times \tau_l(1 - \exp(-\tau_p/\tau_l)). \quad (5)$$

Подстановка уравнения (5) в (1) дает выражение для расчета коэффициента усиления

$$G(t)_{num} = \exp(4\eta_q \cdot \eta_{LDA} \cdot \eta_{ab} \cdot P \times \tau_l(1 - \exp(-\tau_p/\tau_l))/(\delta \cdot \pi d^2 \cdot \Phi_{sat})). \quad (6)$$

Эксперимент

Для верификации численной модели были проведены измерения временного профиля усиленного слабого сигнала и расчеты экспериментального коэффициента усиления. Измерения проводились на экспериментальной установке согласно работе [16], адаптированной под измерение временных профилей усиленных сигналов. На рис. 3 показана оптическая схема экспериментальной установки.

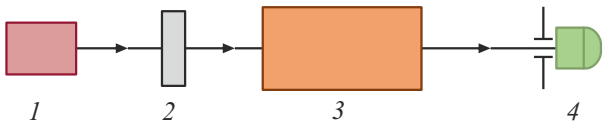


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки: *1* — непрерывный лазер ($\lambda = 1064\,\mathrm{nm}$, $\varnoth 0.8\,\mathrm{mm}$, $P = 100\,\mathrm{mW}$), *2* — светофильтр (коэффициент ослабления 10^2), *3* — квантрон, *4* — фотодиод с диафрагмой.

В качестве источника лазерного излучения использовался твердотельный непрерывный лазер с длиной волны излучения 1064 nm (поз. 1). Для расчета усиления в приосевой области квантрона (поз. 3) рассматривался лазерный пучок диаметром 0.8 mm (по уровню $1/e^2$) и мощностью 1 mW после ослабления светофильтром (поз. 2). Данное излучение распространялось вдоль центральной оси АЭ, усиливалось и регистрировалось фотодиодом (поз. 4), который был подключен к осциллографу. Апертура проходящего через АЭ пучка в ~ 5 раз меньше диаметра АЭ. Перед фотодиодом использовалась диафрагма для уменьшения детектирования основной части спонтанного излучения (люминесценции) генерируемого квантроном. Спонтанное излучение не усиливает основной сигнал непрерывного твердотельного лазера, а лишь накладывается на него, искажая истинное значение коэффициента усиления. Поэтому в эксперименте проводилось измерение временного профиля спонтанного излучения при выключенном твердотельном непрерывном лазере. На рис. 4 показаны экспериментально измеренные временные зависимости сигналов накачки ЛДР с амплитудой $I = 20\,\mathrm{A} \times 5\,\text{ЛДР} = 100\,\mathrm{A}$, люминесценции и усиленного слабого сигнала.

Из зависимостей, представленных на рис. 4, *b* видно, что на участке $0\,\mu\mathrm{s} \le t \le 100\,\mu\mathrm{s}$ изображен сигнал лазерного излучения, прошедшего через квантрон без осуществления накачки АЭ. Следующий промежуток времени длительностью $\Delta t = 250\,\mu\mathrm{s}$ совпадает с началом и окончанием импульсов излучений ЛДР. При этом зависимости люминесценции и усиленного излучения возрастают и достигают максимального значения в момент остановки процесса накачки АЭ. Далее до момента начала следующего импульса накачки зависимости убывают. Это связано с тем, что происходит распад инверсии населенностей (верхнего лазерного уровня) в результате спонтанного излучения. Аналогичным образом проведены измерения при различных значениях амплитуды импульса тока накачки ЛДР $100\,\mathrm{A} \le I_{\max} \le 225\,\mathrm{A}$ с шагом $\Delta I_{max} = 25\,\mathrm{A}$.

На основе измеренных данных проведен расчет коэффициента усиления слабого сигнала $G(t)$, который определялся как отношение усиленного излучения к неусиленному входному. Наличие люминесценции, которая накладывается на усиленный импульс излучения, искажает истинное значение коэффициента усиления. Поэтому для достоверного расчета коэффициента усиле-

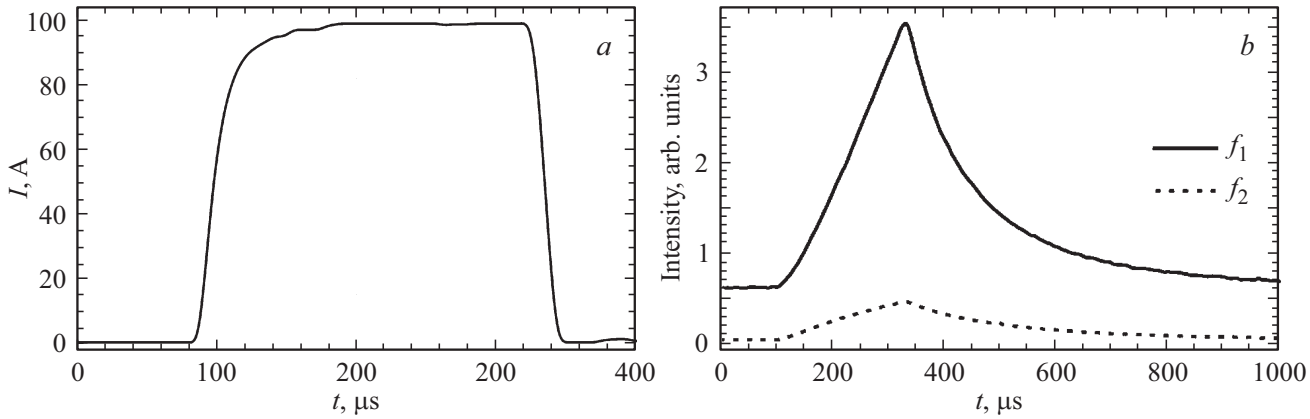


Рис. 4. Временные зависимости (a) импульса тока накачки источника питания ЛДР, (b) сигналов усиленного слабого сигнала (сплошная кривая) и люминесценции (пунктирная кривая).

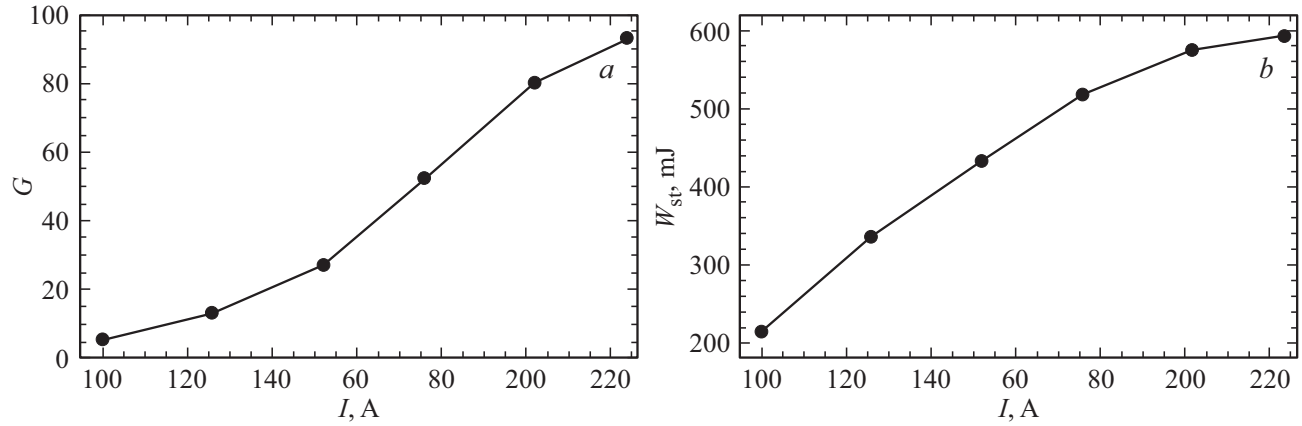


Рис. 5. Экспериментально рассчитанные значения амплитуды временных форм коэффициента усиления (a) и запасенной энергии (b) при различных значениях амплитуды тока накачки ЛДР.

ния проводилось вычитание амплитуды регистрируемого сигнала люминесценции из амплитуды регистрируемого усиленного излучения: $f_1(t) - f_2(t)$. Далее проводились расчеты, предполагая, что потери на поглощении в среде Nd^{3+}:YAG входного излучения (длиной волны 1064 nm) [17] и френелевские потери на торцах АЭ пренебрежимо малы. Оценка экспериментального коэффициента усиления осуществляется согласно формуле

$$G(t)_{\text{exp}} = (f_1(t) - f_2(t))/(f_1(0\,\mu\text{s} \le t \le 50\,\mu\text{s}) - f_2(0\,\mu\text{s} \le t \le 50\,\mu\text{s})).$$

На рис. 5 показаны зависимости амплитуды значений коэффициента усиления и запасенной энергии от амплитуды тока накачки ЛДР, рассчитанные на основе экспериментальных данных.

Максимальное значение коэффициента усиления слабого сигнала составило $G \sim 100$ при запасенной в АЭ квантрона энергии ~ 0.6 J на предельном токе накачке 225 A. Затрачиваемая электрическая энергия при этом равнялась $W_{el} = 7$ J. Таким образом, оптическая эффективность квантрона была на уровне 9 %:

$$\eta_{opt} = W_{st}/W_{el}.$$

Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования

На основе экспериментальных данных и расчётной формулы (6) проводилось построение численной модели коэффициента усиления и запасенной энергии в режиме усиления. Электрическая мощность накачки ЛДР определялась с помощью экспериментально измеренных параметров: $I(t)$ — временной зависимости тока накачки ЛДР (рис. 4 (1)); $U = 125$ V — напряжение, прикладываемое к ЛДР (задаваемое значение на блоке питания); I_{st} — значения тока накачки в момент времени начала усиления:

$$P(t) = U \cdot (I(t) - I_{st}).$$

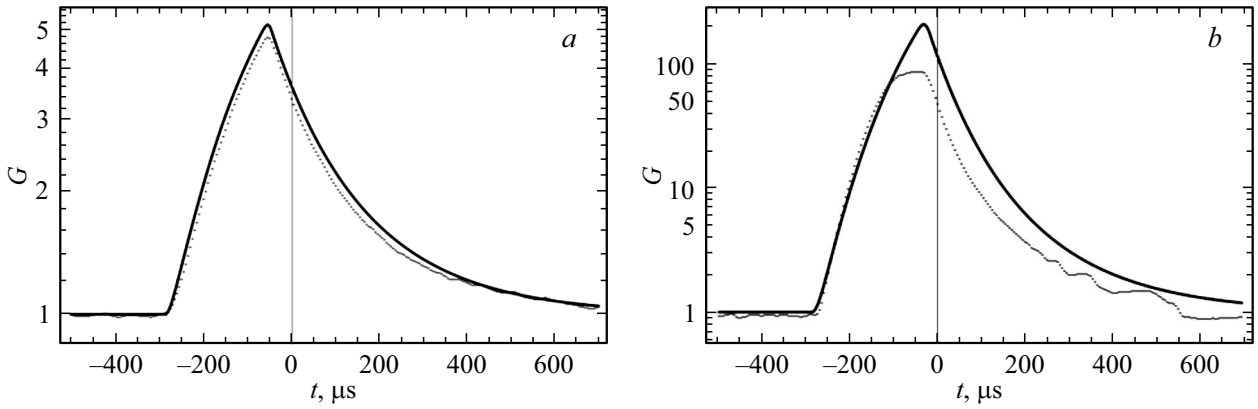


Рис. 6. Зависимости экспериментального (пунктирная кривая) и численного (сплошная кривая) коэффициентов усиления от времени при минимальной $I_{\min} = 100\,\text{A}$ (a) и максимальной $I_{\max} = 225\,\text{A}$ (b) амплитудах тока накачки.

Значения входных параметров численной модели коэффициента усиления

Расчетные значения				Экспериментальные и справочные значения				Параметры	
η_q, %	η_{ab}, %	η_{LDA}, %	δ, %	U, V	τ_l, μs	τ_p, μs	Φ_{sat}, J/cm^2	I_{st}, A	η_0, %
76	77	36	60	125	230	250	0.667	40	62

Таким образом, численная модель коэффициента усиления $G(t)_{num}$ определялась по формуле

$$G(t)_{num} = \exp(4\eta_q \cdot \eta_0 \cdot \eta_{LDA} \cdot \eta_{ab} \cdot \tau_l(1 - \exp(-\tau_p/\tau_l)) \cdot U \cdot (I(t) - I_{st}) / (\delta \cdot \pi d^2 \cdot \Phi_{sat})), \quad (7)$$

где η_0 и I_{st} — подбираемые параметры численной модели. В формуле (7) присутствует числовой коэффициент η_0, который включает в себя неучтённые потери (например, вследствие тепловых эффектов). В таблице представлены значения входных параметров численной модели коэффициента усиления (7).

Значения параметров η_0 и I_{st} подбирались так, чтобы численная и экспериментальная зависимости коэффициента усиления наиболее точно совпадали друг с другом при различных амплитудах тока накачки. На рис. 6 представлены зависимости при минимальной и максимальной амплитудах тока накачки.

Также на рис. 7 представлена зависимость амплитуды экспериментального и численного коэффициентов усиления от амплитуды тока накачки ЛДР.

По рис. 6 и 7 видно, что в диапазоне токов накачки ЛДР от 100 A до ~ 180 A наблюдается соответствие экспериментальной и расчетной зависимостей. Однако при превышении значения тока ~ 180 A видно отличие, которое связано с появлением насыщения усиления или паразитной генерацией, которые в значительной степени влияют на коэффициент усиления [18]. Это следует учесть при численном расчете коэффициента усиления квантрона.

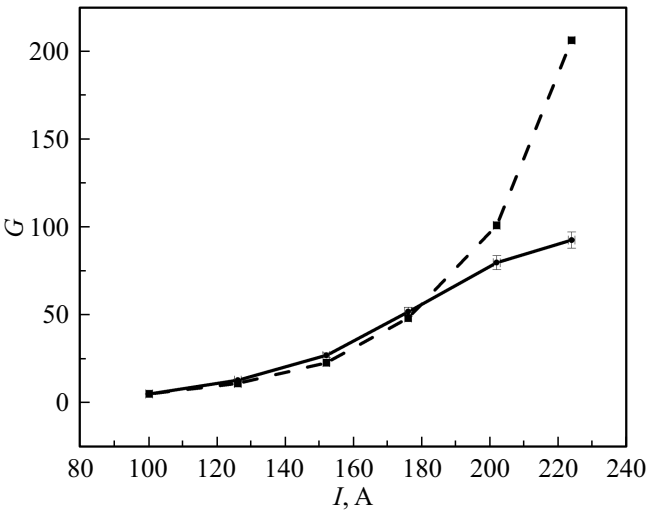


Рис. 7. Зависимость амплитуды временных форм экспериментального (сплошная кривая) и численного (пунктирная кривая) коэффициентов усиления при различных значениях амплитуды тока накачки ЛДР.

Заключение

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований разработан метод расчета численной модели параметров квантрона с поперечной диодной накачкой для цилиндрического АЭ. Данная модель позволяет строить пространственное распределение поглощенной мощности по апертуре АЭ с расчетом однородности распределения люминесценции и

проводить оценку коэффициента усиления, запасенной энергии, суммарной поглощенной мощности излучения накачки в АЭ, эффективности поглощения и оптической эффективности. В модели учтены конструктивные, энергетические, спектральные и оптические параметры квантрона. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными при отсутствии возникновения эффекта насыщения усиления и паразитной генерации.

Благодарности

Авторы благодарят А.А. Сироткина и В.Б. Цветкова за плодотворные обсуждения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] P. Kronenberg, O. Traxer. World J. Urol., **33**, 463 (2015). DOI: 10.1007/s00345-015-1534-3
[2] J. J. Zhang, J. Rutherford, M. Solomon, B. Cheng, J. R Xuan, J. Gong, H. Yu, M.L.D. Xia, X. Yang, T. Hasenberg, S. Curran. Journal of Healthcare Engineering, **5**, (2018). DOI: 10.1155/2018/8261801
[3] C. Yang, S. Li, Y. Cui. The Journal of Urology, **98** (4), 373 (2017). DOI: 10.1159/000452610
[4] P.F. McManamon, G. Kamerman, M. Huffaker. Laser Radar Technology and Applications, **15**, 76840T (2010). DOI: 10.1117/12.862562
[5] B. Crepy, G. Closse, J. Da Cruz, D. Sabourdy, J. Montagne, L. Nguyen. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, **9**, 85410R (2012). DOI: 10.1117/12.977854
[6] R.J. De Young, N.P. Barnes. Applied Optics, **49** (4), 562 (2010). DOI: 10.1364/AO.49.000562
[7] A. Szafarczyk, C. Toś. Sensors, **23** (1), 292 (2023). DOI: 10.3390/s23010292
[8] M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, S. Juodkazis. Light: Science & Applications, **5**, 16133 (2016). DOI: 10.1038/lsa.2016.133
[9] J.I. Kato, N. Takeyasu, Y. Adachi, H.B. Sun, S. Kawata. Appl. Phys. Lett., **86**(4), 044102 (2005). DOI: 10.1063/1.1855404
[10] V.N. Lednev, A.E. Dormidonov, P.A. Sdvizhenskii, M.Ya. Grishin, A.N. Fedorov, A.D. Savvin, E.S. Safronova, S. Pershin, J. Anal. At. Spectrom, **33** (2), 294 (2017). DOI: 10.1039/C7JA00319F
[11] E. Wintner, H. Kofler, A.K. Agarwal, M.A. Deneva, M.N. Nenchev. Annual Journal of Electronics, **1**, 1–8 (2014).
[12] S.G. Rebrov, V. Golubev, Y. Kosmachev, V. Kosmacheva. Proc. High. Educ. Institutions. Machine Build, **12** (12), 104 (2019). DOI: 10.18698/0536-1044-2019-12-104-114
[13] В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Н.А. Кудашева, Б.Д. Овчаренко, В.Б. Цветков. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой, патент РФ №184832. (Бюл. №32, 2018).
[14] С.В. Гарнов, К.А. Галюк, Б.Д. Овчаренко, А.А. Ушаков, В.В. Букин. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, **516**, 10 (2024). DOI: 10.31857/S2686740024030028
[15] О. Звелто. *Принципы лазеров* (Лань, СПб., 2008), с. 435–439.
[16] В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Т.В. Долматов, Н.А. Кудашева, Б.Д. Овчаренко, В.Б. Цветков. Установка для измерения характеристик оптических диодных усилителей, патент РФ №188170 (Бюл. №10, 21.11.2018).
[17] С.Г. Гаранин, В.В. Осипов, В.А. Шитов, В.И. Соломонов, К.Е. Лукьяшин, А.В. Спирина, Р.Н. Максимов, Е.В. Поздняков. Оптика атмосферы и океана, **29** (2), 102 (2016). DOI: 10.15372/AOO20160203
[18] B.D. Ovcharenko, V.K. Bagdasarov, V.V. Bukin, T.V. Dolmatov, D.D. Chesalin, V.B. Tsvetkov, S.V. Garnov. Laser Phys. **30** (9), 095003 (2020). DOI: 10.1088/1555-6611/aba59e