

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.

Продemonстрирован 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. % ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$). 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, запасенной 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 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ с примесными ионами неодима и концентрацией 1 at. % ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$). 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

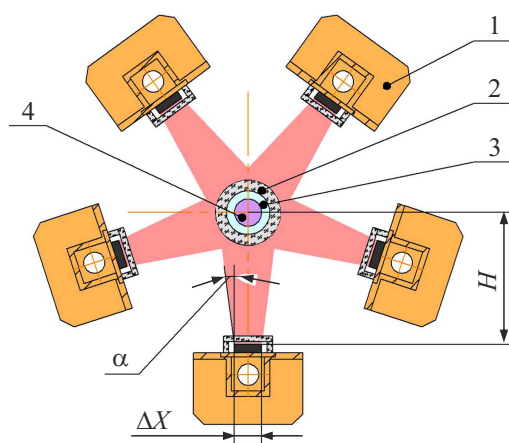


Рис. 1. Оптическая принципиальная схема квантрона (поперечное сечение) с поперечной диодной накачкой: 1 — ЛДР; 2 — кварцевая трубка; 3 — хладагент; 4 — АЭ.

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

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 ($45 \text{ A} \times 5 \text{ ЛДР}$), длительностью $250 \mu\text{s}$, частотой повторения 2 Hz при падении напряжения 125 V . Суммарная оптическая мощность накачки в квантроне составляет 10 kW ($2 \text{ kW} \times 5 \text{ ЛДР}$). 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 $P_p = 10 \text{ kW}$ — 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 $P_{ab} \approx 7.7 \text{ kW}$, что соответствует энергии поглощенного излучения в АЭ $\sim 1.9 \text{ J}$.

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

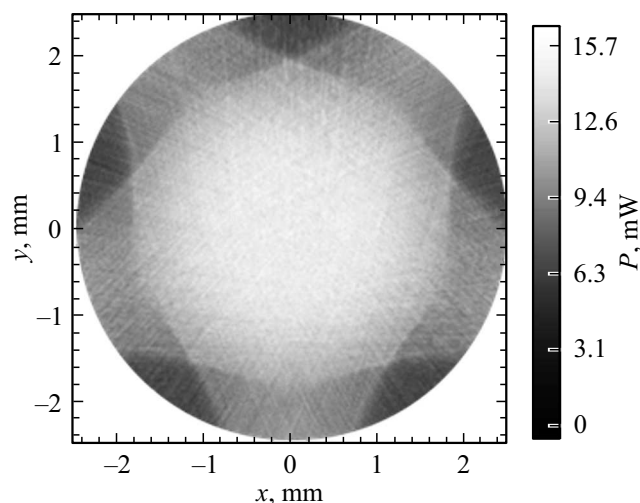


Рис. 2. Пространственное распределение мощности поглощенного излучения в поперечном сечении АЭ.

качки в поперечном сечении АЭ (d — диаметр цилиндрического АЭ), $\Phi_{sat} = 0.667 \text{ J/cm}^2$ — плотность энергии насыщения при значении сечения насыщения $\sigma = 2.8 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$ [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, $\eta_q = \lambda_p/\lambda_r = 808 \text{ nm}/1064 \text{ nm} = 76\%$ — квантовая эффективность в АЭ, $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ — центральная длина волны излучения ЛДР, $\lambda_r = 1064 \text{ nm}$ — центральная длина волны выходного лазерного излучения, $\eta_{LDA} \approx 36\%$ — оптическая эффективность ЛДР (эффективность преобразования электрической энергии в оптическую), $\tau_l = 230 \mu\text{s}$ — время жизни атома на верхнем уровне в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ [15]. В результате преобразований и интегрирования уравнения (2) по времени получаем

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

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

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

Из уравнений (3) и (4) следует выражение запасенной энергии в квантроне за время $t = \tau_p = 250 \mu\text{s}$ 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

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

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.

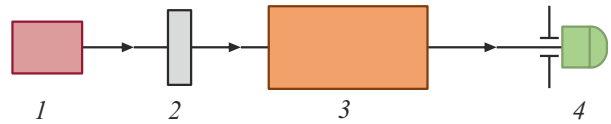


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 — непрерывный лазер ($\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\varnothing 0.8 \text{ mm}$, $P = 100 \text{ mW}$), 2 — светофильтр (коэффициент ослабления 10^2), 3 — квантрон, 4 — фотодиод с диафрагмой.

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 $I = 20 \text{ A} \times 5 \text{ ЛДР} = 100 \text{ A}$, люминесценции и усиленного слабого сигнала.

Из зависимостей, представленных на рис. 4, *b* видно, что на участке $0 \mu\text{s} \leq t \leq 100 \mu\text{s}$ изображен сигнал лазерного излучения, прошедшего через квантрон без осуществления накачки АЭ. Следующий промежуток времени длительностью $\Delta t = 250 \mu\text{s}$ 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 $100 \text{ A} \leq I_{\text{max}} \leq 225 \text{ A}$ с шагом $\Delta I_{\text{max}} = 25 \text{ A}$.

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 усиления

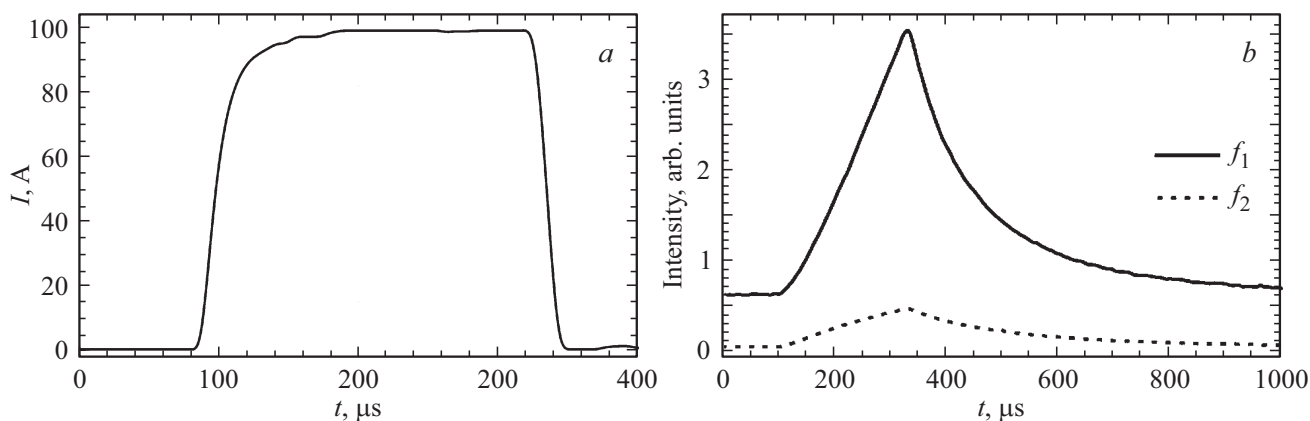


Рис. 4. Временные зависимости (а) импульса тока накачки источника питания ЛДР, (б) сигналов усиленного слабого сигнала (сплошная кривая) и люминесценции (пунктирная кривая).

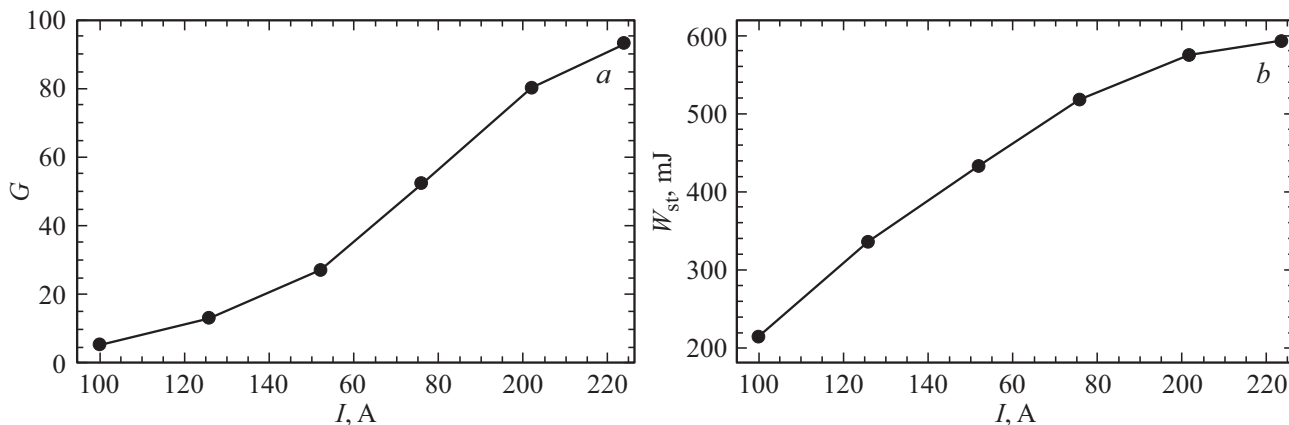


Рис. 5. Экспериментально рассчитанные значения амплитуды временных форм коэффициента усиления (а) и запасенной энергии (б) при различных значениях амплитуды тока накачки ЛДР.

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

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

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 А. Затрачиваемая электрическая энергия при этом равнялась $W_{el} = 7$ J. Таким образом, оптическая эффек-

тивность 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:

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

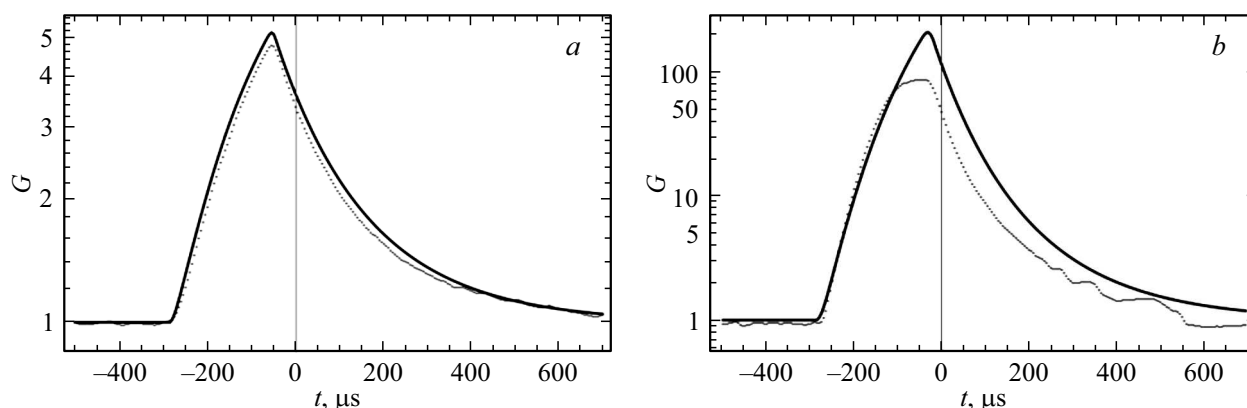


Рис. 6. Зависимости экспериментального (пунктирная кривая) и численного (сплошная кривая) коэффициентов усиления от времени при минимальной $I_{\min} = 100$ А (а) и максимальной $I_{\max} = 225$ А (б) амплитудах тока накачки.

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 , μ s	τ_p , μ s	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 неучтенные 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 А до ~180 А наблюдается соответствие экспериментальной и расчетной зависимостей. Однако при превышении значения тока ~180 А 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.

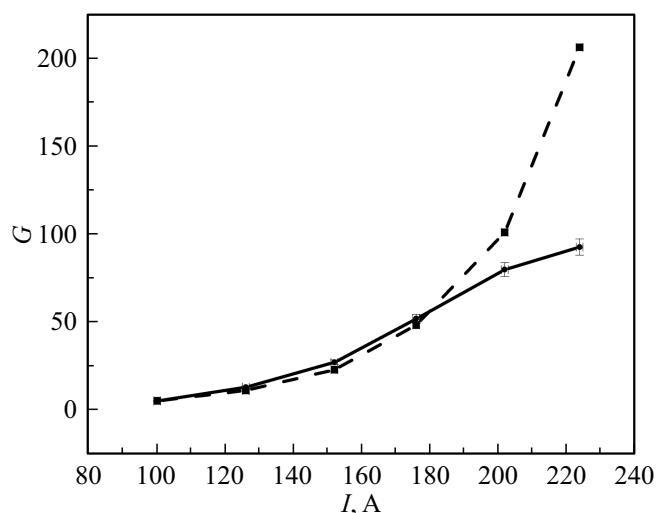


Рис. 7. Зависимость амплитуды временных форм экспериментального (сплошная кривая) и численного (пунктирная кривая) коэффициентов усиления при различных значениях амплитуды тока накачки ЛДР.

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