

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ СЛАБОГО СИГНАЛА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КВАНТРОНОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ Nd:YAG

Д. Д. Чесалин, В. Х. Багдасаров, В. В. Букин,
Т. В. Долматов, Б. Д. Овчаренко

Показано, что прямое измерение коэффициента усиления слабого сигнала активного элемента при его просвечивании зондирующим лазером может давать результат, значительно меньший, чем в измерении по порогу лазерной генерации. Обсуждается возможная причина такого несоответствия.

Ключевые слова: коэффициент усиления, квантрон, Nd:YAG, диодная накачка.

1. *Введение.* На сегодняшний день твердотельные лазеры широко используются во многих областях науки и техники [1]. Перспективные направления развития связаны с использованием оптической накачки матрицами лазерных диодов [2]. Применение диодной накачки позволяет получить высокие КПД и значения запасенной энергии и, соответственно, коэффициент усиления (КУ) слабого сигнала активного элемента (АЭ) [3]. Ключевым элементом твердотельных лазеров и усилителей с диодной накачкой является квантрон – модуль, в котором происходит накачка АЭ. Основные параметры квантрона – распределение люминесценции по сечению АЭ, запасенная энергия и КУ. Измерение КУ, таким образом, является важной задачей с точки зрения определения характеристик квантрона.

КУ G связан с сечением усиления σ соотношением:

$$G = \exp(N_0 \sigma l), \quad (1)$$

где N_0 – плотность инверсии населенностей, l – длина активной среды [4]. Для измерения КУ широко используются два метода: прямой метод усиления с задающим генератором (ЗГ) и метод, основанный на пороговой лазерной генерации (генерационный).

Прямой метод основан на измерении отношения мощностей входного и выходного излучения. Генерационный метод основан на нахождении порога генерации лазера с известными потерями в оптическом резонаторе. В данной работе измерение КУ проводилось обоими методами.

В экспериментах использовались квантроны с импульсной диодной накачкой с активной средой Nd:YAG (алюмоиттриевый гранат, легированный неодимом), конструкция которых представлена в [5]. Размеры АЭ составляли $\text{Ø}5 \times 120$ мм и $\text{Ø}10 \times 160$ мм с концентрацией атомов неодима 0.6 и 1%. Оба торца каждого АЭ были просветлены на длину волны генерации 1064 нм, а также закошены на угол 2° к его оси. Для накачки использовались лазерные диодные решетки (ЛДР) производства НПО «Инжект» с максимальной мощностью 2 кВт. Длительность накачки составляла 250 мкс.

2. Описание экспериментальных установок и методов измерения КУ

2.1. Метод с задающим генератором

На рис. 1 представлена схема измерительного стенда в методе с задающим генератором.

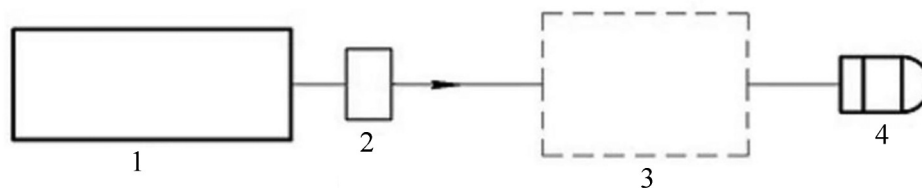


Рис. 1: Схема измерительного стенда (метод с задающим генератором): 1 – задающий генератор; 2 – оптический фильтр; 3 – квантрон; 4 – фотодиод.

Измерительный стенд, описанный в [6], состоял из непрерывного твердотельного задающего генератора (ЗГ) с активной средой Nd:YAG, излучающего на длине волны 1064 нм с мощностью 100 мВт, излучение которого заводилось в квантрон и проходило через центр АЭ. Диаметр лазерного пучка, который заводился в центр АЭ, составлял 0.8 мм (по уровню половинной интенсивности). Распределение люминесценции АЭ измерялось с помощью цифровой камеры с телецентрическим объективом и не имело характерных особенностей на масштабе диаметра пучка ЗГ, что позволяло локально измерить КУ при просвечивании зондирующим лазером. Распределение люминесценции по горизонтальному и вертикальному сечению в АЭ диаметром 10 мм показано на рис. 2.

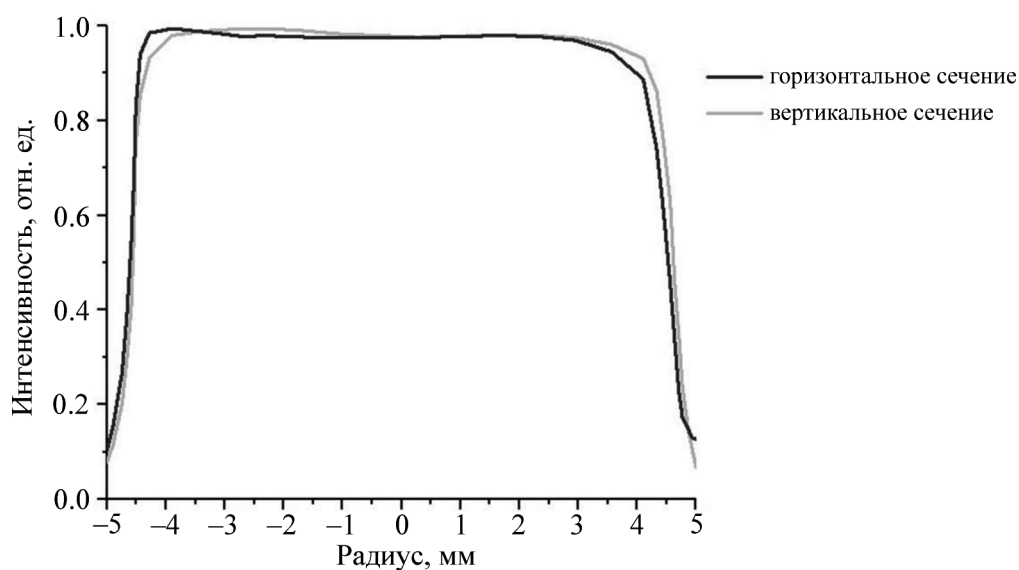


Рис. 2: Распределение люминесценции по горизонтальному и вертикальному сечению в АЭ диаметром 10 мм.

Для того чтобы импульс люминесценции АЭ не давал вклада в сигнал, измеряемый фотодиодом, и не искажал измерение КУ, фотодетектор был установлен на расстоянии около 2 м от выходного торца АЭ. Для проверки корректности измерений излучение зондирующего лазера перекрывалось, и на фотодетекторе наблюдался только импульс люминесценции, мощность которого в случае использования АЭ диаметром 10 мм оказалась на 2 порядка меньше мощности усиленного зондирующего излучения. При использовании АЭ диаметром 5 мм импульс люминесценции на фотодетекторе составлял не более 0.1% от усиленного импульса.

Мощность непрерывного излучения ЗГ, подаваемая на вход усилителя, ослаблялась оптическим фильтром, располагающимся перед ним, и составляла 10 мВт, что не приводило к изменению КУ из-за уменьшения инверсии в АЭ. Временная зависимость мощности усиленного излучения регистрировалась фотодиодом. Типичная зависимость мощности усиленного излучения от времени приведена на рис. 3.

На участке, предшествующем накачке, КУ равен единице, так как потери на прохождение АЭ составляют менее 1% и ими можно пренебречь. Участок, на котором КУ возрастает, соответствует длительности импульса накачки (250 мкс). Максимум КУ достигается в момент окончания накачки. Далее происходит падение мощности до первоначальной из-за спонтанного распада инверсии.

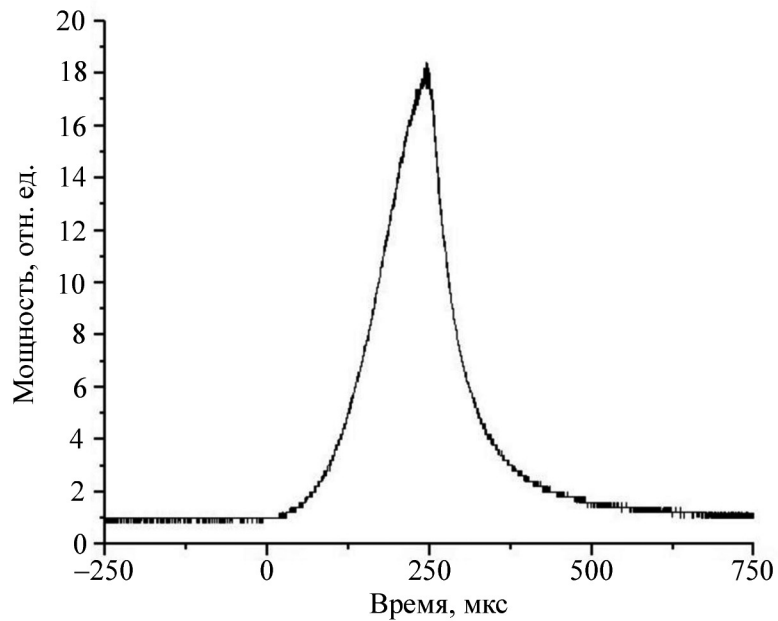


Рис. 3: Зависимость мощности усиленного излучения от времени.

2.2. Метод нахождения пороговой генерации (генерационный метод)

На рис. 4 представлен измерительный стенд для метода пороговой генерации.

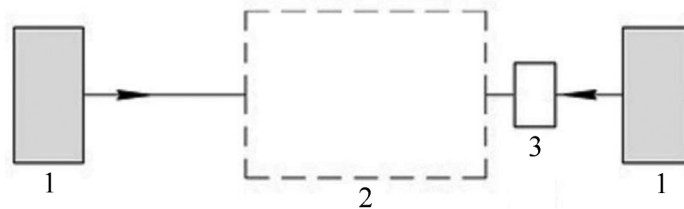


Рис. 4: Стенд измерительный (генерационный метод): 1 – зеркала, 2 – квантрон, 3 – оптический фильтр.

Измерительный стенд состоял из двух плоскопараллельных зеркал с различными коэффициентами отражения, набором ослабляющих оптических фильтров и квантрона. Генерационный метод заключается в получении генерации лазера на пороге, когда усиление в активной среде равно потерям за один проход в резонаторе. Потери в резонаторе регулировались подбором комбинации зеркал резонатора и ослабляющих оптических фильтров.

На пороге генерации КУ определяется соотношением:

$$G_T = \frac{1}{T\sqrt{R_1 R_2}},$$

где T – коэффициент пропускания оптических фильтров; R_1, R_2 – коэффициенты отражения зеркал.

В эксперименте находится ток накачки, соответствующий порогу генерации. Далее при этом же токе проводились измерения прямым методом с ЗГ.

3. *Результаты и их обсуждение.* Зависимость КУ от тока накачки для квантрона с диаметром АЭ 10 мм, измеренная двумя методами, показана на рис. 5.

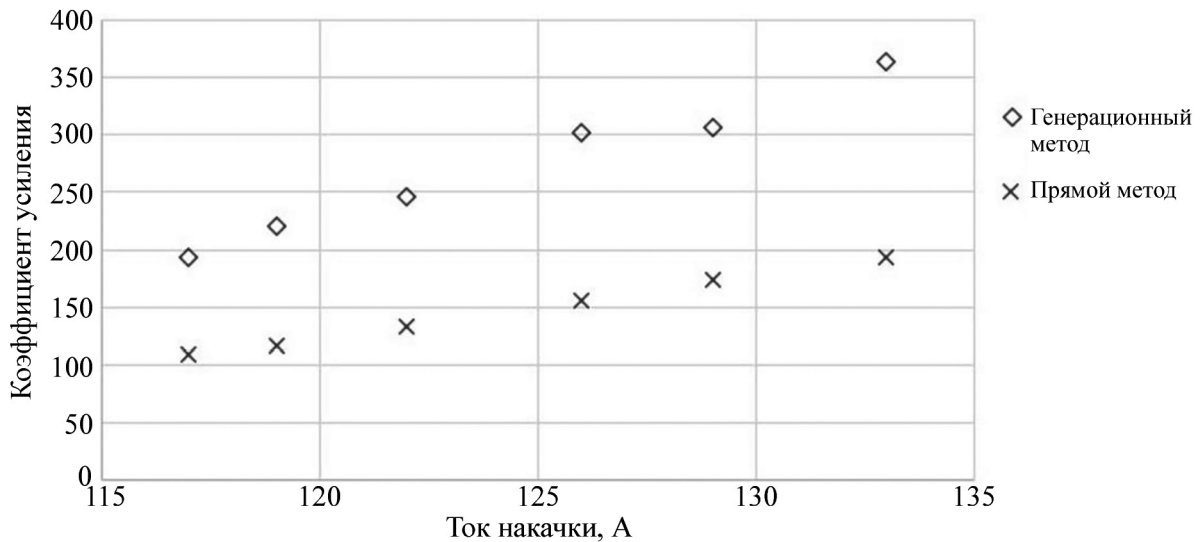


Рис. 5: Зависимость КУ от тока накачки, измеренная двумя методами на Nd:YAG квантроне с диаметром АЭ 10 мм.

Из графиков видно, что КУ в генерационном методе при одинаковом токе больше КУ в прямом методе для всех значений тока накачки. При увеличении тока накачки отношение значений КУ, измеренных двумя методами, также увеличивается. Помимо зависимостей КУ от тока накачки на АЭ с 20 ЛДР были экспериментально получены значения КУ на других квантронах, которые отличались диаметром АЭ и количеством ЛДР. Все значения КУ, измеренные двумя методами, показаны на рис. 6 в логарифмическом масштабе при наложении прямой $G_d = G^{0.9}$.

Видно, что КУ, измеренный генерационным методом, во всех экспериментах больше, чем КУ, измеренный с использованием ЗГ.

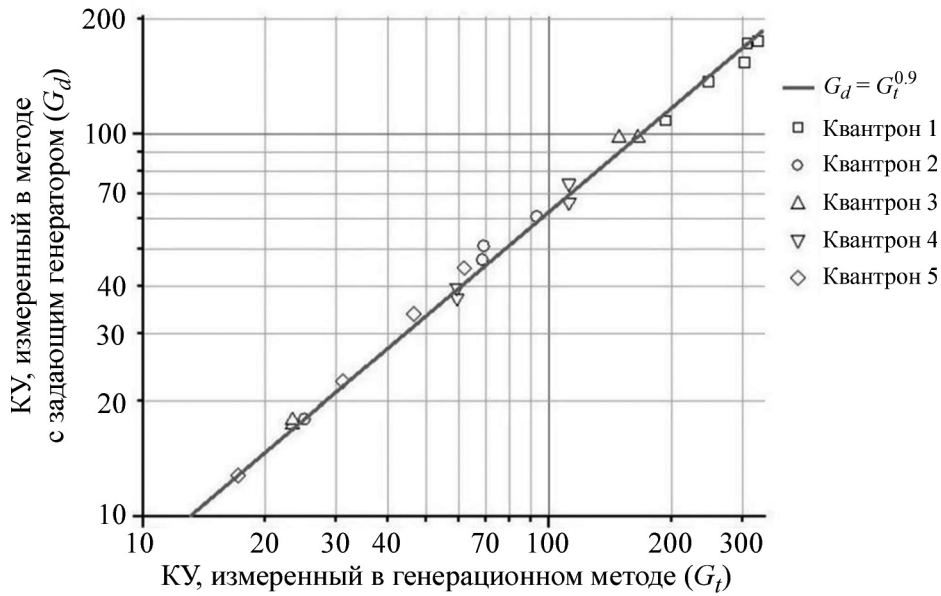


Рис. 6: КУ, измеренные двумя методами; линия - $G_d = G_t^{0.9}$; точки - экспериментальные данные.

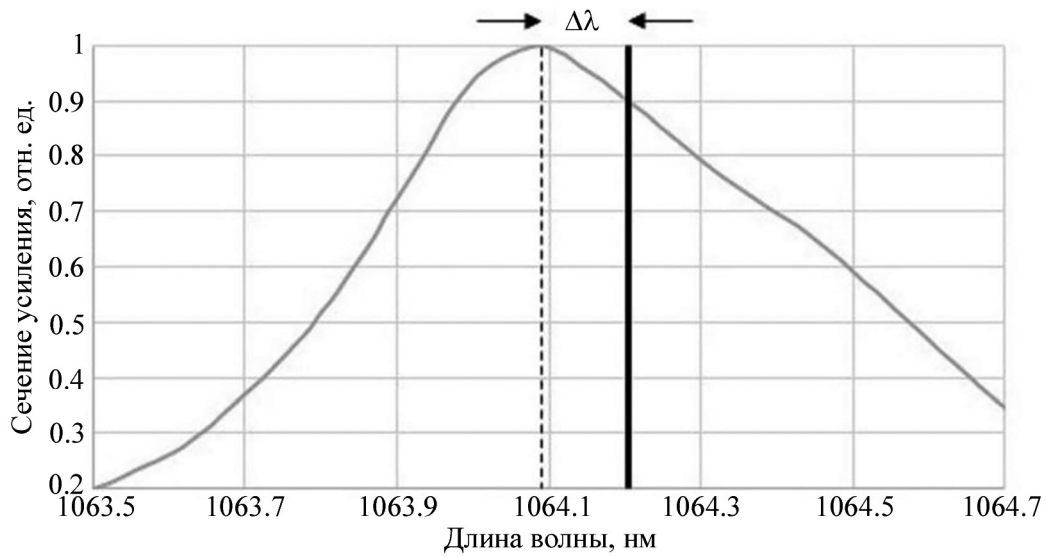


Рис. 7: Спектральная зависимость сечения усиления от длины волны ЗГ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; жирная вертикальная линия - длина волны, соответствующая максимальному сечению усиления.

Такое отличие не может быть объяснено погрешностями в измерении величины потерь, входящей в (2). Действительно, при систематической погрешности в определении

потерь зависимость (рис. 6) представляла бы собой выражение $G_d = \alpha \cdot G_t$, в то время как график на рис. 6 демонстрирует зависимость $G_d = 1 \cdot G_t^{0.9}$.

Возможным объяснением различия измеренных КУ является отличие температур активных сред ЗГ и квантрона. В выражении $G = \exp(N_0 \sigma l)$ КУ, измеряемому в методе с ЗГ, соответствует сечение усиления активной среды квантрона усилителя на длине волны ЗГ. А на длине волны ЗГ должен достигаться максимум сечения усиления АЭ при температуре ЗГ. Температурный сдвиг максимума спектра люминесценции в Nd:YAG составляет 0.0047 нм/°С [6]. На рис. 7 показана спектральная зависимость сечения усиления от длины волны ЗГ при температуре 20 °С, взятая из [7].

Как видно из рис. 7, при отстройке длины волны ЗГ $\Delta\lambda$ на 0.115 нм от максимума спектральной зависимости, соответствующее сечение составляет 0.9 от пикового значения. Такой отстройке соответствует разность температур активных сред в ~ 25 °С, что вполне может быть объяснено нагревом активной среды в ЗГ с продольной диодной накачкой.

4. *Заключение.* Логарифмический КУ активной среды, измеренный генерационным методом, оказался на 10% больше КУ, измеренного методом с ЗГ. Результаты измерений КУ при просвечивании зондирующим лазером могут значительно (\sim в 1.8 и более раз) отличаться от КУ, измеряемого по порогу генерации. Температурная отстройка длины волны ЗГ вследствие нагрева активной среды зондирующего лазера может существенно влиять на КУ излучения ЗГ в усилителе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] W. Koechner, *Solid-state laser engineering. Sixth revised and updated edition* (New York, Springer, 2006), 750 p. DOI:10.1007/0-387-29338-8_7.
- [2] N. P. Barnes, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **13**(3), 435 (2007). DOI: 10.1109/JSTQE.2007.895280.
- [3] С. Г. Гречин, П. П. Николаев, Квантовая электроника **39**(1), 1 (2009). DOI: 10.1070/QE2009v039n01ABEH013787.
- [4] O. Svelto, D. C. Hanna, *Principles of lasers* (New York, Springer, 2010), Vol. 1. DOI: 10.1007/978-1-4419-1302-9.
- [5] В. Х. Багдасаров, С. А. Бельков, С. Г. Гаранин и др., Патент РФ на полезную модель RU 184832 U1 от 01.02.2018, опубликован 12.11.2018.

- [6] В. Х. Багдасаров, С. А. Бельков, В. В. Букин и др., Патент РФ на полезную модель RU 188170 U1 от 21.11.2018, опубликован 02.04.2019.
- [7] Y. Sato, T. Taira, Optical Materials Express **2**(8), 1076 (2012). DOI: 10.1364/OME.2.001076.

Поступила в редакцию 9 марта 2020 г.

После доработки 20 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.