

# Поглощение импульсного лазерного излучения композитами на основе гексогена и наночастиц алюминия

Б.П.Адуев, Д.Р.Нурмухаметов, А.А.Звеков, А.В.Каленский, И.Ю.Лисков

*Теоретически и экспериментально исследовано поглощение излучения второй гармоники импульсного YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера композитами на основе гексогена и наночастиц алюминия (диаметром 100 нм). С использованием теории Ми рассчитан фактор эффективности поглощения (отношение сечения поглощения света к геометрическому сечению) для включений Al в среде гексогена в зависимости от диаметра частиц на длинах волн, соответствующих первой и второй гармоникам излучения лазера. С помощью пьезоакустического преобразователя измерены зависимости показателя поглощения и амплитуды акустического сигнала от концентрации включений при воздействии лазерного излучения на образцы композитов. Показано, что поглощение излучения происходит непосредственно наночастицами. Найдена оптимальная концентрация включений, при которой амплитуда сигнала пьезопреобразователя максимальна.*

**Ключевые слова:** гексоген, наночастицы алюминия, композитные материалы, лазерное излучение, поглощение излучения, оптоакустика.

## 1. Введение

Взрывные и детонационные явления исследуются уже более ста лет [1–5]. Одно из направлений таких исследований – взрывчатое разложение вещества под действием лазерного излучения – возникло в 60-х гг. прошлого века [6]. Особый интерес для исследователей представляла разработка чувствительных к лазерному излучению материалов, которые можно было бы использовать в качестве детонаторов штатных взрывчатых веществ (ВВ) [7, 8]. Один из способов повышения чувствительности штатных ВВ к лазерному излучению – создание композитных материалов с включениями во ВВ светопоглощающих добавок. Такие работы были начаты в 80-х гг. [9, 10], но в дальнейшем не получили продолжения.

В последнее десятилетие нами активно ведутся исследования композитов тетранитропентаэритрита (PETN) с включениями металлов или углеродных материалов. Опубликовано более 20 работ (см., напр., [11–18]). Показано, что при оптимальной концентрации включений частиц металлов нанодисперсных размеров, например Al, показатель экстинкции  $k_{\text{eff}}$  излучения первой гармоники импульсного неодимового лазера частицами включений достигает  $\sim 200 \text{ см}^{-1}$ , поэтому энергия излучения поглощается в поверхностном слое толщиной  $h = 1/k_{\text{eff}} \approx 50 \text{ мкм}$  [12]. При этом за время действия импульса повышается температура металлческих включений, запускается экзотермическая химическая реакция с выделением дополнительного тепла в слое, прилегающем к частице

включения, т.е. формируется «горячая точка» [18]. При достаточном количестве «горячих точек» образуется ударная волна, которая распространяется в необлученную часть образца и в конечном счете приводит к взрыву [18]. Однако как в наших работах, так и в работах других авторов в качестве матрицы композитного материала используется PETN. Для установления совпадений и различий в особенностях лазерного инициирования взрыва разных композитных материалов представляет интерес исследование материалов с другими матрицами, например гексогеном (RDX), который прозрачен для лазерного излучения и имеет более низкую чувствительность ко всем видам воздействия, чем PETN. На первом этапе необходимо выполнение теоретических расчетов и экспериментов для дозрывного режима. В настоящей работе приведены результаты исследований возможности поглощения лазерного излучения композитами RDX–Al, которые не только представляют самостоятельный интерес, но и позволяют в дальнейшем оптимизировать проведение экспериментов с использованием лазерного инициирования взрыва композитных материалов.

## 2. Объекты исследования и методики эксперимента

В качестве исходного материала использовался порошок RDX с узким гранулометрическим распределением. В максимуме распределения размер частиц составляет 1–2 мкм. Другой компонент – порошок Al марки Alex с диаметром частиц в максимуме распределения 100 нм. Частицы Al покрыты оксидной оболочкой толщиной  $\sim 5 \text{ нм}$ , прозрачной для лазерного излучения. Методика приготовления образцов с различным содержанием Al в основном не отличается от методики приготовления образцов PETN–Al, которая подробно описана, например, в работе [11]. Образцы прессовались в отверстия, которое находилось в центре медной пластины (держатель образца) с помощью гидравлического пресса. При изготовле-

Б.П.Адуев, Д.Р.Нурмухаметов, А.А.Звеков, И.Ю.Лисков. Институт углеродной и химической материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углеродной СО РАН, Россия, 650000 Кемерово, просп. Советский, 18; e-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru  
А.В.Каленский. Кемеровский государственный университет, Россия, 650000 Кемерово, ул. Красная, 6

Поступила в редакцию 3 сентября 2018 г., после доработки – 30 октября 2018 г.

нии образцов давление увеличивалось до 1.8 ГПа в течение 60 мин. В результате получались образцы с плотностью  $1.80 \pm 0.02 \text{ г/см}^3$ .

Для лазерного инициирования использовалась вторая ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ ) гармоника YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера, работающего в режиме модуляции добротности. Длительность импульса на полувысоте составляла 14 нс. Эксперименты проводились в дозрывном режиме, поэтому использовалась плотность энергии в импульсе  $30 \text{ мДж/см}^2$ , при которой повреждение образцов во время действия импульса облучения минимально. Однако такого воздействия достаточно для надежной регистрации сигнала с помощью пьезопреобразователя из керамики ЦТС-19, аналогичного применяемому в работах [11, 17]. Регистрация сигнала пьезодетектора осуществлялась осциллографом LeCroy 332 WJ. Методика эксперимента подобна описанной в [18].

### 3. Результаты и их обсуждение

Ранее на основе теории Ми нами была разработана методика расчета фактора эффективности поглощения электромагнитного излучения  $Q_{\text{abs}}$  (отношение сечения поглощения света к геометрическому сечению) наночастицами металлов в матрице PETN в зависимости от их радиуса и длины волны излучения, которая подробно изложена в [19, 20].

В настоящей работе проведен расчет зависимостей фактора эффективности поглощения излучения включениями Al в среде RDX от диаметра частиц для длин волн  $\lambda$ , соответствующих первой и второй гармоникам излучения неодимового лазера, с использованием методик, описанных в [19, 20]. Показатели преломления алюминия, согласно [21], составляют  $0.884 - 6.470i$  и  $1.226 - 10.041i$  для  $\lambda = 532$  и  $1064 \text{ нм}$  соответственно. Показатель преломления RDX определялся экстраполяцией зависимости, экспериментально полученной в [22] в спектральной области  $2.5 - 18 \text{ мкм}$ . При тех же длинах волн показатель преломления RDX был равен  $1.594$  и  $1.593$ . Результаты расчетов представлены на рис.1.

В нашем распоряжении имеется порошок алюминия марки Alex с диаметром частиц в максимуме распределения  $100 \text{ нм}$ . Как следует из расчетов, значение  $Q_{\text{abs}}$  для излучения второй гармоники лазера более чем в четыре раза превышает таковое для первой гармоники (рис.1). В связи с этим все дальнейшие эксперименты с композитом RDX-Al проводились с использованием излучения второй гармоники лазера.

Исследовался акустический отклик на лазерное воздействие образцов с содержанием алюминия  $0, 0.025,$

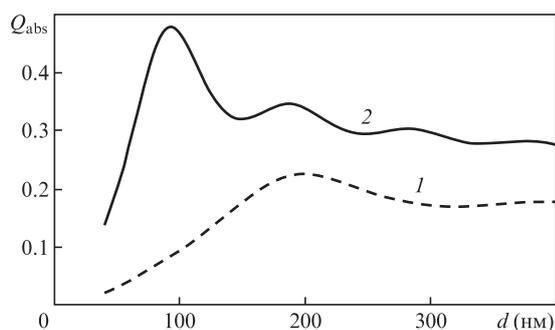


Рис.1. Расчетные зависимости факторов эффективности поглощения электромагнитного излучения наночастицами алюминия от их диаметра  $d$  для  $\lambda = 1064$  (1) и  $532 \text{ нм}$  (2).

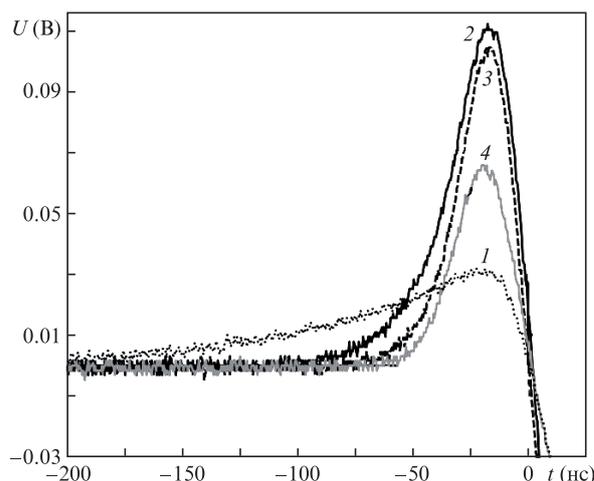


Рис.2. Осциллограммы акустического отклика на лазерное воздействие гексогена с содержанием алюминия  $0.05$  (1),  $0.2$  (2),  $0.3$  (3) и  $0.5 \text{ мас. \%}$  (4).

$0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$  и  $0.7 \text{ мас. \%}$ . У образцов без включений Al в пределах чувствительности аппаратуры акустический отклик не регистрируется. Следовательно, материал RDX слабо поглощает излучение лазера. Образцы, содержащие включения, дают хорошо регистрируемый сигнал. Для примера на рис.2 приведены типичные осциллограммы таких сигналов. За начало отсчета времени, как и в [18], принят момент времени перехода импульса сжатия в импульс растяжения. Временной интервал от  $0$  до  $-20 \text{ нс}$  соответствует переходной характеристике пьезопреобразователя при переходе от импульса сжатия к импульсу растяжения. Часть импульса в интервале от  $-20$  до  $-200 \text{ нс}$  передает распределение тепловых источников по глубине образца [23] и хорошо описывается экспоненциальным законом с постоянной времени

$$\tau_a = (k_{\text{eff}} c_0)^{-1}, \quad (1)$$

где  $c_0$  – скорость звука в среде.

Скорость звука в образцах определялась экспериментально по временному интервалу между первичным и отраженным сигналам и составила  $3000 \pm 200 \text{ м/с}$ .

Из экспериментальных осциллограмм для образцов с различной концентрацией включений  $n$  измеряли  $\tau_a$  и затем рассчитывали значения  $k_{\text{eff}}$  по формуле (1). Результаты расчета представлены на рис.3. Видно, что зависимость  $k_{\text{eff}}$  от концентрации включений является линейной. Аналогичную зависимость мы получили ранее для включений Al в PETN [12]. Опираясь на формулы для рассеивающих сред с поглощением из работ [24–26], в [12] мы показали, что в случае линейной зависимости  $k_{\text{eff}}$  от концентрации включений за поглощение ответственно преимущественно включения, а вклад в  $k_{\text{eff}}$  рассеяния излучения в матрице незначителен.

Зависимость амплитуды акустического сигнала в композите RDX-Al от концентрации Al представлена на рис.4. Аналогичные зависимости мы получали для амплитуд акустических сигналов композитов PETN-Al [12] и PETN-Fe [27]. При этом оказалось, что концентрациям  $n$ , соответствующим максимальной амплитуде оптоакустического сигнала, отвечают минимальные пороги взрывчатого разложения при лазерном инициировании [12, 27]. Объяснение этому эффекту дано в работе [13]. Суть его

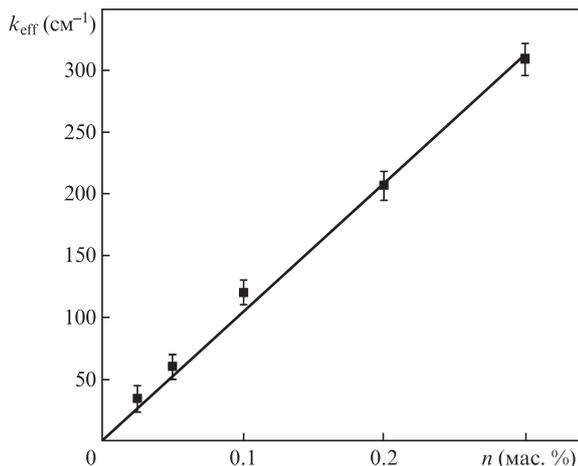


Рис.3. Зависимость показателя экстинкции  $k_{\text{eff}}$  от концентрации включений  $n$  для композитов гексоген–алюминий.

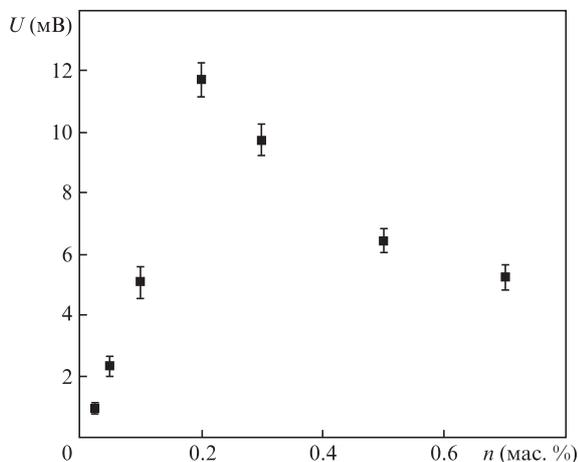


Рис.4. Амплитуда акустического сигнала при воздействии на композит RDX–Al второй гармоники излучения лазера в зависимости от концентрации включений Al.

заключается в том, что при концентрации включений от нуля до  $n_{\text{opt}} = 0.2$  мас. % режим лазерного облучения является адиабатическим, а именно слой толщиной  $h = k_{\text{eff}}^{-1}$ , в котором осуществляется нагрев образца в результате импульсного поглощения энергии, не успевает расширяться. При увеличении  $n$  свыше 0.2 мас. % увеличивается  $k_{\text{eff}}$  (соответственно уменьшается толщина слоя  $h$ ). Длина акустической волны  $\lambda < \tau_p c_0$  ( $\tau_p$  – длительность импульса лазера) оказывается сравнимой с толщиной поглощающего слоя  $h$ . Вследствие акустической разгрузки уже во время импульса облучения слой, поглощающий излучение, расширяется, причем тем сильнее, чем больше  $n$ . Таким образом, при  $n > n_{\text{opt}}$  происходит переход от адиабатического режима к квазистационарному [23]. В результате расширения в облученном слое уменьшается давление и, следовательно, амплитуда акустического сигнала (рис.4). При проведении экспериментов во взрывном режиме, как показано в [12, 27], при увеличении концентрации включений свыше  $n_{\text{opt}}$  увеличивается порог взрывчатого разложения. Таким образом, приведенные на рис.4 данные позволяют определить оптимальную концентрацию  $n_{\text{opt}}$ , соответствующую минимальному порогу взрывчатого разложения, что в дальнейшем сократит трудозатраты при нахождении этого порога для композита RDX–Al.

## 4. Выводы

1. Рассчитаны факторы эффективности поглощения излучения  $Q_{\text{abs}}$  на  $\lambda = 532$  и 1064 нм для включений Al в среде RDX в зависимости от диаметра частиц, из которых следует, что дальнейшие эксперименты с инициированием взрыва композитов целесообразнее проводить с использованием второй гармоники излучения неодимового лазера.

2. Показано, что в композите RDX–Al излучение второй гармоники неодимового лазера поглощается преимущественно частицами Al.

3. Исследование зависимости амплитуды сигнала пьезодетектора от концентрации включений позволило определить их оптимальную концентрацию  $n_{\text{opt}} = 0.2$  мас.%, при которой прогнозируется минимальный порог взрывчатого разложения для композита RDX–Al при воздействии второй гармоники излучения неодимового лазера.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-03-00421А, а также программы базового бюджетного финансирования по теме V.49.1.5. (регистрационный номер АААА-А17-117041910150-2).

1. Chapman D.L. *Philos. Mag.*, **47**, 90 (1899).
2. Jouquet E. *Mecanique des Explosifs* (Paris: Doin et Fils, 1917).
3. Neumann J. *Progress Report to the National Defense Research Committee* (New York: Pergamon Press, 1942).
4. Зельдович Я.Б. *ЖЭТФ*, **10** (5), 542 (1940).
5. *Физика взрыва*. Под ред. К.П.Станюковича (М.: Наука, 1975).
6. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. и др. *Физика горения и взрыва*, **5** (4), 475 (1969).
7. Maiman T.H. *Nature*, **187** (4736), 493 (1960).
8. Javan A., Bennett W.R. Jr., Herriott D.R. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 106 (1961).
9. Александров В.Е., Долголаптев А.В., Иоффе В.Б., Ковальчук В.М. и др. *Физика горения и взрыва*, **19** (4), 17 (1983).
10. Иоффе В.Б., Долголаптев А.В., Александров В.Е., Образцов А.П. *Физика горения и взрыва*, **21** (3), 51 (1985).
11. Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Нурмухаметов Д.Р., Нелюбина Н.В. *Физика горения и взрыва*, **48** (3), 127 (2012).
12. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Фурега Р.И., Лисков И.Ю. *Химическая физика*, **3** (12), 29 (2014).
13. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звекон А.А., Никитин А.П., Каленский А.В. *Физика горения и взрыва*, **52** (6), 104 (2016).
14. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Нелюбина Н.В., Ковалёв Р.Ю., Никитин А.П. и др. *Физика горения и взрыва*, **52** (5), 108 (2016).
15. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В., Гудилин А.В. *Оптика и спектроскопия*, **122** (3), 522 (2017).
16. Каленский А.В., Звекон А.А., Ананьева М.В., Никитин А.В., Адуев Б.П. *Физика горения и взрыва*, **53** (1), 92 (2017).
17. Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Нурмухаметов Д.Р., Пузынин А.В. *Химическая физика*, **29** (1), 70 (2010).
18. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Нелюбина Н.В., Тупицын А.В. *Оптика и спектроскопия*, **124** (3), 404 (2018).
19. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Фурега Р.И., Звекон А.А., Каленский А.В. *Химическая физика*, **32** (8), 39 (2013).
20. Каленский А.В., Звекон А.А., Никитин А.П., Ананьева М.В., Адуев Б.П. *Оптика и спектроскопия*, **118** (6), 1012 (2015).
21. Palik E.D. *Handbook of Optical Constants of Solids* (San Diego: Academic Press Inc., 1985, vol. 1).
22. Isbell R.A., Brewster M.Q. *Propellants Explos., Pyrotech.*, **23**, 218 (1998).
23. Гусев В.Э., Карабутов А.А. *Лазерная оптоакустика* (М.: Наука, 1991).
24. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е. *Квантовая электроника*, **29** (3), 215 (1999) [*Quantum Electron.*, **29** (12), 1054 (1999)].
25. Gardner C.M. et al. *Lasers Surg. Med.*, **18**, 129 (1996).
26. Jacques S.L. *J. Photochem. Photobiol.*, **67**, 23 (1998).
27. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звекон А.А., Никитин А.П., Ковалев Р.Ю. *Химическая физика*, **35** (7), 38 (2016).