

УДК 621.373.826

О РАБОТЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗАТВОРА НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

В. С. Зуев, Ю. В. Сенатский

Приводятся результаты экспериментов по облучению тонкой алюминиевой пленки на лавсановой основе (“майлар”) лазерными импульсами наносекундной длительности. Пленка использовалась в качестве оптической развязки в одной из первых лазерных установок на неодимовом стекле с мощностью ≈ 1 ГВт. При прохождении через пленку пучка генератора с модулированной добротностью были получены импульсы с крутизной переднего фронта ≈ 1 нс. Обсуждается механизм быстрого ($10^{-9} - 10^{-10}$ с) просветления оптического затвора на основе металлической пленки.

Ключевые слова: неодимовый лазер, оптический затвор, алюминиевая пленка.

Введение. Тонкая пленка металла, испаряемая излучением, применялась в лазерах на рубине и неодимовом стекле в качестве одного из первых доступных оптических затворов: в резонаторах – для модуляции добротности и в усилителях – для развязки каскадов и формирования временного профиля лазерного импульса, а также для развязки лазерной установки от мишени [1–9]. Возможность применения пленочного затвора определялась его быстродействием: высокой скоростью просветления поглощающего слоя металла при испарении [1–9]. Несмотря на свою привлекательность (простота изготовления, низкая стоимость), испаряющаяся пленка являлась затвором однократного действия, который после срабатывания не восстанавливал исходное малое пропускание. Это обстоятельство, а также отсутствие точной синхронизации момента срабатывания затвора с работой установки ограничивали его применение, и пленочный затвор вскоре был вытеснен в лазерных установках электрооптическими затворами, просветляющимися красителями и другими устройствами. Вместе с тем, экспериментальные данные о работе затвора на основе металлической пленки могут представлять интерес в контексте результатов исследований взаимодействия лазерного излучения с

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: senatsky@sci.lebedev.ru.

металлами, которые проводятся с 60-х годов по настоящее время [10–25]. В литературе обсуждались процессы взрывного вскипания, просветления слоя металла в результате перехода металл–диэлектрик и др. В ходе НИР по созданию мощного оптического квантового генератора [2] затвор на Al пленке был применен нами в одной из первых лазерных установок на неодимовом стекле с мощностью ≈ 1 ГВт для оптической развязки задающего генератора с модулированной добротностью от усилителя и обострения переднего фронта усиливаемого импульса. В настоящей работе приводятся не публиковавшиеся ранее сведения об этой установке и результаты экспериментов по облучению Al пленки на лавсановой основе (“майлар”) наносекундными ($10^{-8} - 10^{-7}$ с) импульсами неодимового лазера [2, 5]. При прохождении через пленку пучка излучения от генератора с модулированной добротностью были получены импульсы с крутизной передних фронтов ≈ 1 нс. Обсуждается механизм просветления оптического затвора на основе Al пленки.

Эксперимент. Для увеличения энергии излучения в первых лазерах с модулированной добротностью на неодимовом стекле в резонаторах применялись активные элементы (стержни) с большим ($100-1000$ см³) объемом активной среды [2, 3]. Нами использовался разработанный на Ленинградском оптико-механическом объединении осветитель ГОС-300 со стержнем из стекла КГСС-7 $\varnothing 30 \times 600$ мм [8]. Для модуляции добротности резонатора применялся затвор ЗРГ-5М (вращающаяся призма со световым диаметром 30 мм), разработанный на Красногорском оптико-механическом заводе [2]. Выходным зеркалом резонатора служила стеклянная пластинка, рис. 1(а), в состав лазерной установки (рис. 1(в)) входили собственно генератор на стержне $\varnothing 30 \times 600$ мм (1) и двухкаскадный усилитель на таких же стержнях (2, 3), торцы которых срезались под углом $\approx 2^\circ$ к оси.

Для оптической развязки генератора от усилителя в схему лазера дополнительно вводился затвор: пленка “майлар”, напыление которой испарялось под действием излучения [2]. Затвор представлял собой слой Al толщиной около 0.05 мкм, нанесенный на лавсановую ленту шириной 5 см и толщиной 20 мкм, рис. 1(б). Пропускание пленки на $\lambda \approx 1.06$ мкм для слабого сигнала не превышало 0.1% , так что генератор был оптически развязан от усилителя. В отсутствие пленки при включении добротности вращающейся призмой стержни 1–3 оказывались оптически связанными и, фактически, образовывали единый генератор, в котором развивалось несколько импульсов с длительностью 150–200 нс и энергией ≈ 80 Дж. Для получения на выходе лазерной системы одиночного импульса в генераторе формировался ≈ 80 нс импульс с энергией до

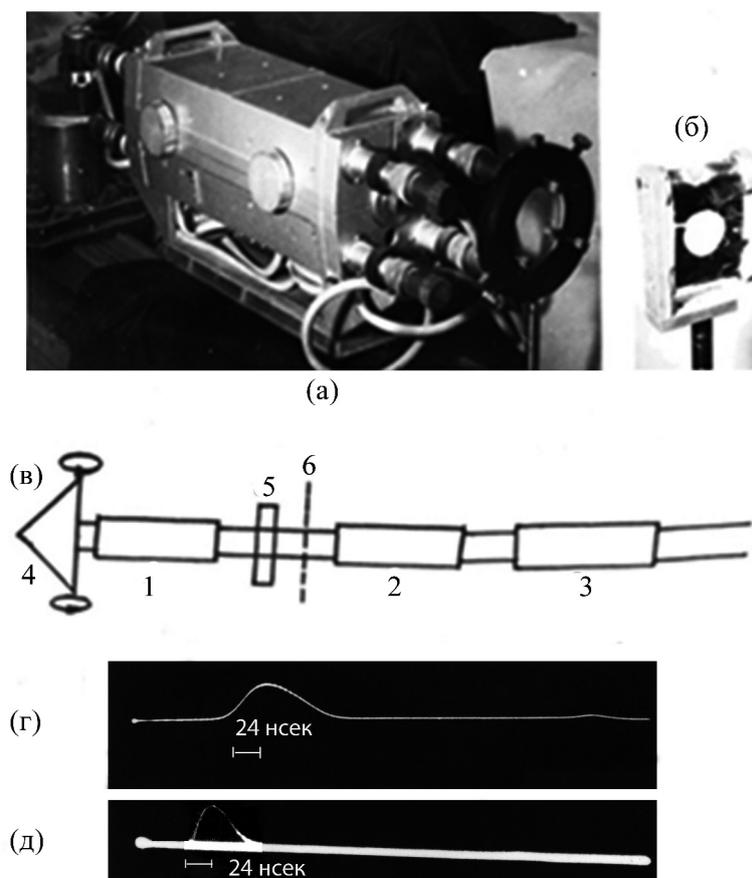


Рис. 1: Генератор с модуляцией добротности и усилитель на стержнях $\varnothing 30 \times 600$ мм из стекла КГСС-7 в осветителях ГОС-300: (а) фотография осветителя генератора, вращающейся призмы и выходного зеркала; (б) пленка “майлар” на перемоточном устройстве (после прохождения лазерного пучка); (в) схема генератора на стержне (1) с вращающейся призмой (4), выходным зеркалом (5) и 2-каскадным усилителем на стержнях (2, 3) с затвором на пленке “майлар” (6); осциллограммы импульсов генератора (г) и на выходе системы генератор–усилитель (д).

10 Дж в пучке $\varnothing 30$ мм, рис. 1(г), который направлялся на пленочный затвор и затем в усилитель. При поглощении затвором начального участка импульса генератора (с плотностью мощности $10^7 - 10^8$ Вт/см²) тонкий Al слой испарялся, пропуская оставшуюся часть импульса в усилитель (пропускание лавсановой основы для излучения с интенсивностью до 10^{10} Вт/см² составляет $\approx 90\%$). В этих условиях можно было ожидать обострения переднего фронта и сокращения длительности импульса. Осциллограмма ≈ 50 нс импульса с укороченным передним фронтом ≈ 10 нс на выходе усилителя при-

водится на рис. 1(д). Энергия импульса составила ≈ 60 Дж, расходимость излучения $\approx 3 \cdot 10^{-3}$ рад, мощность свыше 1 ГВт [2], что в свое время (1965 г.) было достижением для неодимовых лазеров. Демонстрацией достигнутого уровня мощности было первое наблюдение так называемой “длинной лазерной искры” – области протяженного оптического пробоя (рис. 2) при фокусировке излучения с выхода лазерной установки линзой с фокусом ≈ 3 м в воздухе. Исследованию “длинной лазерной искры” была посвящена работа [26] и другие публикации.

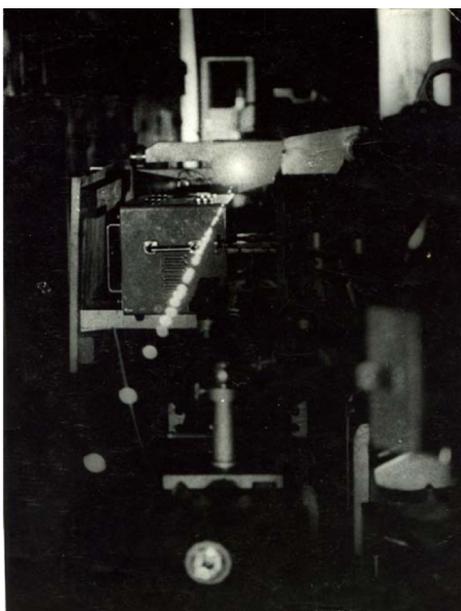


Рис. 2: Фотография “длинной лазерной искры” – области оптического пробоя протяженностью около 4 м, возникавшей в воздухе при фокусировке линзой с фокусом ≈ 3 м импульса излучения с мощностью ≈ 1 ГВт с выхода лазерной установки на неодимовом стекле (навильон лаборатории квантовой радиофизики, 1965 г.). Часть изображений “искр” размыта из-за недостаточной глубины резкости при фотосъемке.

Для проверки быстрого действия пленочного затвора был поставлен дополнительный эксперимент, схема и результат которого представлены на рис. 3. На затвор направлялся ≈ 20 нс импульс с энергией 1–2 Дж от генератора с модуляцией добротности ячейкой Керра (плотность мощности до 10^8 Вт/см²) [27], рис. 3(а). Было установлено, что при плотности энергии в импульсе $\varepsilon < \varepsilon_{cr} \approx 0.4$ Дж/см² (ε_{cr} соответствовало порогу испарения плёнки) просветления пленки (испарения Al слоя) не происходило. Зная удельную теплоту сублимации Al ($\approx 10^4$ Дж/г)[20], можно оценить энергию, необходимую для испарения Al пленки толщиной 0.05 мкм на площадке 1 см². Оценка

показала, что $\varepsilon_{\text{cr}} \approx 0.4$ Дж/см² соответствует энергии, необходимой (с учетом отражения) для испарения 1 см² слоя пленки. При $\varepsilon < \varepsilon_{\text{cr}}$ весь импульс, проходивший пленку, ослаблялся в $\approx 10^3$ раз. Для устранения только малоинтенсивного начального участка импульса генератора с модулированной добротностью и выделения основной части импульса необходим режим работы при $\varepsilon > \varepsilon_{\text{cr}}$. При этом, если плотность энергии начального участка не достигает критической величины, пленочный затвор задерживает эту часть импульса. С ростом интенсивности импульса условие $\varepsilon > \varepsilon_{\text{cr}}$ выполняется, затвор просветляется, и основная часть импульса проходит затвор с малыми потерями.

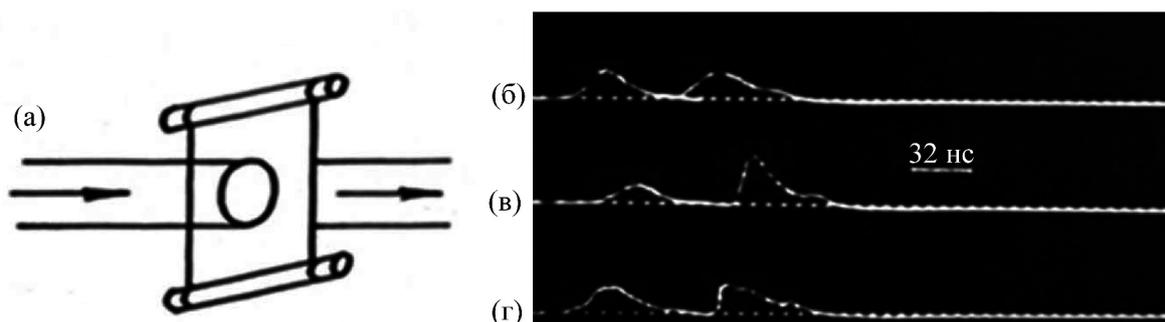


Рис. 3: Схема формирования импульса генератора с модулированной добротностью с затвором на основе Al пленки (а) и осциллограммы импульсов до (слева) и после (справа) прохождения затвора и оптической задержки: прожигание Al пленки полным сечением пучка (б) и через диафрагмы $\varnothing 5$ мм (в) и $\varnothing 1.5$ мм (г).

Испарение Al пленки при $\varepsilon > \varepsilon_{\text{cr}}$ осуществлялось как полным пучком генератора диаметром около $\varnothing 10$ мм (без ограничения диафрагмой), так и через диафрагмы $\varnothing 5$ мм и $\varnothing 1.5$ мм, которые устанавливались вне резонатора и вырезали центральную часть пучка. Для регистрации импульсов на входе и на выходе затвора (после световой задержки) применялся фотоэлемент ФЭК-09 и осциллограф С1-14. При сравнении осциллограмм импульсов до и после затвора видно, что заметное сокращение длительности переднего фронта импульсов наблюдается, но только для пучков, прошедших диафрагмы (рис. 3(в), (г)). При облучении плёнки пучком со всего торца активного элемента длительность переднего фронта импульса после затвора практически не сокращалась (рис. 3(б)). В то же время при облучении плёнки пучком, который прошёл через диафрагму $\varnothing 1.5$ мм, фронт прошедшего импульса обострялся до ≈ 1 нс, как показано на осциллограмме рис. 3(г).

Обсуждение результатов эксперимента. Результаты эксперимента, представленного на рис. 3, объясняются наличием пространственно-временной структуры излучения

в лазерном пучке из-за неравномерного по сечению активного элемента развития генерации в многомодовом лазере с модулированной добротностью. При облучении плёнки пучком полного сечения пространственно-временная структура импульса излучения приводила к разновременному просветлению затвора по сечению. В этих условиях сокращения длительности переднего фронта импульса не наблюдалось (рис. 3(б)). Напротив, при облучении затвора излучением только от небольшого участка активной среды через диафрагму, наблюдалось обострение переднего фронта и сокращение длительности импульса (рис. 3(в), (г)). Передний фронт с длительностью ≈ 1 нс после диафрагмы $\varnothing 1.5$ мм соответствовал временному разрешению тракта регистрации, что дает основание предполагать еще большее укорочение фронта пленочным затвором, которое не разрешалось нашей системой регистрации.

Полученный результат указывает на высокую скорость просветления испаряющегося слоя металла, которое, скорее всего, происходило за время короче 1 нс. Данные эксперимента на рис. 3 позволяют также предположить, что именно неравномерное распределение интенсивности в пучке $\varnothing 30$ мм, направлявшемся на пленку в лазерной системе на активных элементах $\varnothing 30 \times 600$ мм (рис. 1), не позволило достигнуть высоких скоростей просветления затвора в этом эксперименте. По той же причине эффект быстрого просветления, по-видимому, не был обнаружен и в экспериментах с Al пленками [7, 28], в которых были зарегистрированы прошедшие пленку лазерные импульсы с крутизной переднего фронта до 10 нс.

В работе [11] на основании экспериментальных данных по взаимодействию лазерного излучения с металлической мишенью было предсказано существование “волны просветления”, во фронте которой жидкий металл на поверхности мишени переходит в области критических температур в жидкий диэлектрик. Коэффициент поглощения лазерного излучения при этом резко снижается. Снижение поглощения и эффект просветления в слое металла на поверхности мишени при лазерном воздействии были экспериментально зарегистрированы в работах [12, 13]. В работе [14] уменьшение коэффициента отражения расплава металла было зарегистрировано по “проседанию” вершины лазерного импульса. Здесь следует также упомянуть работы [18, 19, 22, 24], где было обнаружено явление селективного испарения расплава в кратере при лазерной абляции, которое не было бы возможным без волны просветления [11]. Условия существования “волны просветления”, распространяющейся от поверхности в глубь Al мишени, по данным экспериментов и расчета соответствуют диапазону интенсивностей излучения $10^6 - 10^8$ Вт/см² [11–13, 15].

В работе [13] исследовалось прохождение через Al фольгу толщиной 17 мкм ультрафиолетового излучения плазменного факела, создаваемого у поверхности фольги при ее облучении 30 нс импульсами неодимового лазера. Оценка скорости распространения волны просветления по данным регистрации импульсов ультрафиолетового излучения, прошедших фольгу, дала среднюю скорость волны просветления $5 \cdot 10^4$ см/с. Используемый в наших экспериментах с Al пленкой [2, 5] уровень плотности мощности $10^7 - 10^8$ Вт/см² соответствовал диапазону интенсивностей излучения, при которых должна была возникать “волна просветления”. Это позволяет применить значение скорости “волны просветления” в Al фольге [13] для оценки времени просветления пленки “майлар” в нашем эксперименте. Время распространения “волны просветления” через слой Al толщиной $5 \cdot 10^{-6}$ см на пленке составляет $\approx 10^{-10}$ с. Такая высокая скорость просветления могла сформировать у импульса неодимового лазера, прошедшего пленочный затвор, передний фронт (рис. 3(г)), длительность которого ≈ 1 нс. Возможность регистрации более короткого фронта ограничивалась временным разрешением тракта регистрации.

Таким образом, полученные в наших экспериментах с алюминированной пленкой “майлар” [2, 5] экспериментальные данные по формированию короткого переднего фронта лазерного импульса свидетельствуют в пользу срабатывания механизма “волны просветления” [11], возникающей вследствие фазового перехода “металл–диэлектрик” [29] в слое Al на пленке при облучении ее лазерным пучком. При интенсивности лазерного излучения $10^7 - 10^8$ Вт/см², используя “волну просветления” в пленках различных металлов субмикронной толщины, можно, по-видимому, получать обострение переднего фронта лазерных импульсов в диапазоне $10^{-9} - 10^{-10}$ с при контрасте затвора $\approx 10^3$. Отметим, что эффект просветления слоя металла под действием излучения может быть использован также для формирования заднего фронта лазерного импульса. Для этого возможно использовать быстрый спад коэффициента отражения от металлического зеркала, возникающий при просветлении слоя металла на поверхности. Может быть создано также устройство на основе тонких металлических пленок для вырезания короткого (≤ 1 нс) фрагмента из лазерного импульса. Интерес к затворам на тонких металлических пленках проявлялся в связи с возможностью их применения в качестве коммутаторов излучения СВЧ [28], для защиты оптических устройств, работающих с лазерными пучками [30] и др. Обсуждается также возможность создания затворов на металлической пленке с фс временем переключения на основе другого нелинейно-

го эффекта: насыщения поглощения в металле для излучения в области вакуумного ультрафиолета [31].

Ю. В. Сенатский благодарен С. М. Першину за полезные обсуждения, замечания и поддержку публикации данной работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Grant, Proc. of the IEEE **51**, 604 (1963).
- [2] Н. Г. Басов, Р. В. Амбарцумян, Б. Л. Борович и др., *Отчет о НИР по теме "1Б"* (М., ФИАН, 1966).
- [3] Ю. А. Калинин, А. И. Степанов, *Опт.-мех. пром.*, № 7, 59 (1968).
- [4] J. F. Asmus, *Appl. Optics* **8**, 1252 (1969).
- [5] Ю. В. Сенатский, *Диссертация канд. физ.- мат. наук* (М., ФИАН, 1970).
- [6] П. Г. Крюков, Ю. В. Сенатский, *Препринт ФИАН № 51* (М., ФИАН, 1971).
- [7] М. П. Ванюков, В. И. Исаенко, П. П. Пашинин, и др., *Сборник "Квантовая электроника"* под ред. акад. Н.Г. Басова, № 1, 35(1971).
- [8] Б. Р. Белостоцкий, Ю. В. Любавский, В. М. Овчинников, *Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ* (М., Советское радио, 1972).
- [9] Г. А. Аскарьян, Б. М. Манзон, *Письма в ЖЭТФ* **27**, 113 (1978).
- [10] С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко, *Действие излучения большой мощности на металлы* (М., Наука, 1970).
- [11] В. А. Батанов, Ф. В. Бункин, А. М. Прохоров, В. Б. Федоров, *ЖЭТФ* **63**, 586 (1972).
- [12] А. М. Бонч-Бруевич, С. Е. Потапов, *Письма в ЖТФ* **1**, 353 (1975).
- [13] Ю. И. Дымшиц, *Письма в ЖТФ* **2**, 751 (1976).
- [14] T. E. Zavec, M. A. Saifi, and M. Noits, *Appl. Phys. Lett.* **26**, 165 (1975).
- [15] Ю. И. Шилов, *Физика твердого тела* **19**, 1966 (1977).
- [16] А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, И. Н. Михэилеску, *Взаимодействие лазерного излучения с металлами* (М., Наука, 1998).
- [17] С. И. Андреев, В. И. Мажукин, Н. М. Никифорова, А. А. Самохин, *Квантовая электроника* **33**, 771 (2003).
- [18] С. М. Першин, F. Colao, *Письма в ЖТФ* **31**, 48 (2005).
- [19] S. M. Pershin, F. Colao, and V. Spizzichino, *Laser Physics* **16**, 455 (2006).
- [20] C. Porneala and D. A. Willis, *Int. journal of heat and mass transfer* **49**, 1928 (2006).
- [21] C. Porneala and D. A. Willis, *J. Phys D: Appl. Phys.* **42**, 155503 (2009).
- [22] S. M. Pershin, V. N. Lednev, and A. F. Bunkin, *Physics of Wave Phenomena* **19**, 261 (2011).
- [23] M. H. Mahdih and H. Hosseini Shokoh, *Appl. Phys. A* **106**, 995 (2012).

- [24] С. М. Першин, В. Н. Леднев, Д. Д. Богаткин и др., Квантовая электроника **42**, 605 (2012).
- [25] В. И. Мажукин, А. А. Самохин, М. М. Демин, А. В. Шапранов, Квантовая электроника **44**, 283 (2014).
- [26] Н. Г. Басов, В. А. Бойко, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков, Доклады АН СССР **173**, 538 (1967).
- [27] Н. Г. Басов, В. С. Зуев, Ю. В. Сенатский, Письма в ЖЭТФ **2**, 57 (1965).
- [28] Г. А. Аскарьян, Н. М. Тарасова, Письма в ЖЭТФ **18**, 8 (1973).
- [29] Я. Б. Зельдович, Л. Д. Ландау, ЖЭТФ **14**, 32 (1944).
- [30] В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, В. Б. Шлишевский, Оптический журнал **78**, 39 (2011).
- [31] H. Yoneda, Y. Inubushi, T. Tanaka, et al., Optics Express **17**, 23443 (2009).

Поступила в редакцию 14 октября 2014 г.