

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический**  
**ИНСТИТУТ**



*имени*  
*П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

**В. С. ЗУЕВ**, Ю. В. СЕНАТСКИЙ

**1**

**О РАБОТЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗАТВОРА НА ОСНОВЕ  
ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ**

Москва 2015

## О работе оптического затвора на основе тонкой металлической пленки

В.С. Зуев, Ю.В. Сенатский\*

### Аннотация

*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 с нс импульсами на неодимовом стекле с мощностью  $\approx 1$  ГВт. При прохождении через пленку пучка генератора с модулированной добротностью получены импульсы с крутизной переднего фронта  $\approx 1$  нс. Обсуждается механизм быстрого ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  с) просветления оптического затвора на основе металлической пленки.*

### Operation of the optical shutter using a thin metallic film

V.S. Zuev, Yu.V. Senatsky\*

*The results of experiments on the interaction of nanosecond laser pulses with a thin aluminum film deposited on the lamsan substrate ("mylar") are presented. This film was used as an optical shutter in one of the first neodymium glass laser systems with ns pulses of  $\approx 1$  GW power. Pulses from a Q-switched laser with  $\approx 1$  ns slope of the leading edge were observed after the passage through the film. The mechanism of fast ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  s) bleaching of the optical shutter based on the thin metallic film is discussed.*

\*ФИАН, 119991 Москва, Ленинский проспект, 53; e-mail: [senatsky@sci.lebedev.ru](mailto:senatsky@sci.lebedev.ru).

## 1. 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 одноразового 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 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 в лаборатории КРФ ФИАН в период с 1962г. по 1966 г. [2] затвор на  $Al$  пленке был применен нами в одной из первых лазерных установок на неодимовом стекле с мощностью  $\approx 1$ 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, 26]. При прохождении через пленку пучка излучения от генератора с модулированной добротностью были получены импульсы с крутизной передних фронтов  $\approx 1$ нс. Обсуждается механизм просветления оптического затвора на основе *Al* пленки.

## 2. Эксперимент

Для увеличения энергии излучения в первых лазерах с модулированной добротностью на неодимовом стекле в резонаторах применялись активные элементы (стержни) с большим ( $100\text{см}^3$ – $1000\text{см}^3$ ) объемом активной среды [2,3,5]. Нами использовался разработанный на Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО) осветитель ГОС-300 со стержнем из стекла КГСС-7  $\varnothing 30 \times 600$ мм [8], рис.1а. Для модуляции добротности резонатора применялся затвор ЗРГ-5М (вращающаяся призма со световым диаметром 30мм), разработанный на Красногорском оптико-механическом заводе, рис.1б [2]. Выходным зеркалом резонатора служила стеклянная пластинка. Накачка стержня  $\varnothing 30 \times 600$ мм (1) генератора подбиралась такой, что генератор излучал один импульс с длительностью  $\approx 80$ нс и энергией 10Дж в пучке  $\varnothing 30$ мм, рис.1д. В состав лазерной установки (рис.1г) входили собственно генератор и двухкаскадный усилитель на таких же стержнях  $\varnothing 30 \times 600$ мм (2,3), торцы которых срезались под углом  $\approx 2^\circ$  к оси. Это мероприятие, однако, не устраняло полностью обратную связь в системе генератор-усилитель: при включении добротности вращающейся призмой стержни 1-3, фактически, образовывали единый генератор, в котором развивались 150-200нс импульсы с энергией  $\approx 80$ Дж, рис.1е. Регистрация временного профиля импульсов производилась с помощью фотоумножителя на осциллографе ДЭСО (обзорная развертка, рис.1е) и фотоэлемента типа ФЭК-09 на осциллографе С1-14 (рис.1д, ж).

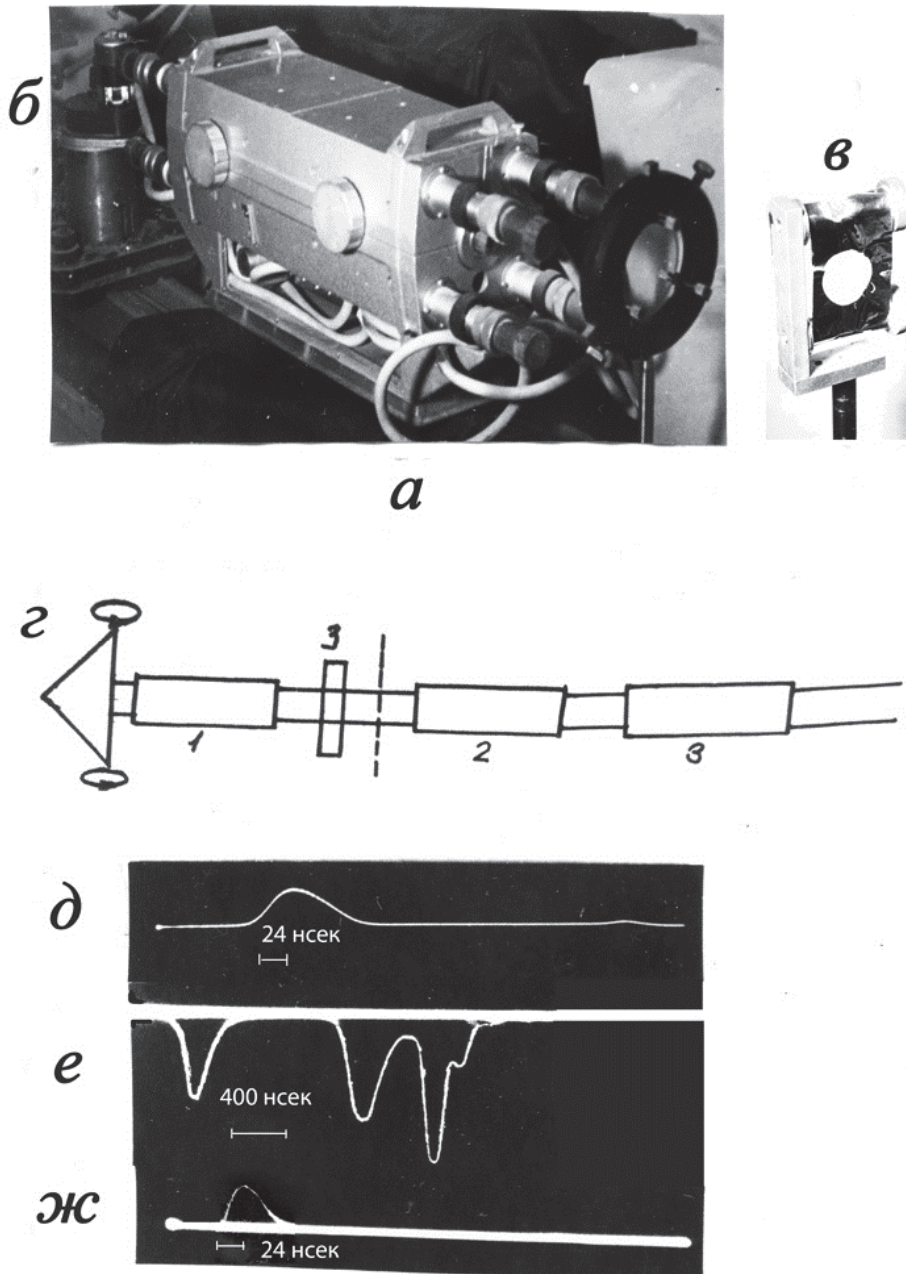


Рис.1. Генератор с модуляцией добротности вращающейся призмой и усилитель на стержнях  $\varnothing 30 \times 600$  мм из стекла КГСС-7 (1,2,3): осветитель ГЭС-300 (а); вращающаяся призма (б); 3 – выходное зеркало генератора; (в)-пленка «майлар» с Al покрытием после прохождения лазерного пучка; (г) - схема генератора и 2-х каскадного усилителя с развязкой на пленке «майлар» (пунктир); осциллограммы импульсов: (д)-генератора; (е,ж) – на выходе системы генератор - усилитель без развязки (е) и с развязкой на основе пленки «майлар» (ж).

Для оптической развязки генератора от усилителя в схему лазера был введен дополнительно единственно доступный нам в то время оптический затвор с

большой апертурой: пленка «майлар», которая испарялась под действием излучения [2]. Затвор представлял собой слой  $Al$  толщиной около  $0,05\text{мкм}$ , нанесенный на лавсановую ленту шириной  $5\text{см}$  и толщиной  $20\text{мкм}$ , рис.1в. Пропускание пленки на  $\lambda \approx 1,06\text{мкм}$  для слабого сигнала не превышало  $0,1\%$ , так что генератор был оптически развязан от усилителя. Одиночный импульс генератора направлялся на пленочный затвор и затем в усилитель. При поглощении затвором начального участка импульса генератора (с плотностью мощности  $10^7\text{-}10^8\text{Вт/см}^2$ ) тонкий  $Al$  слой испарялся (рис.1в), пропуская оставшуюся часть импульса в усилитель (пропускание лавсановой основы для излучения с интенсивностью до  $10^{10}\text{Вт/см}^2$  составляло  $\approx 90\%$ ). В этих условиях можно было ожидать обострения переднего фронта и сокращения длительности импульса. Осциллограмма  $\approx 50\text{нс}$  импульса с укороченным передним фронтом  $\approx 10\text{нс}$  на выходе усилителя представлена на рис.1ж. Энергия импульса составила  $\approx 60\text{Дж}$ , расходимость излучения  $\approx 3 \cdot 10^{-3}\text{рад}$ , мощность свыше  $1\text{ГВт}$  [2], что в свое время (1965 г.) было достижением для неодимовых лазеров.

Демонстрацией достигнутого уровня мощности для первых лазеров с модулированной добротностью было наблюдение оптического пробоя воздуха сфокусированным лазерным излучением [27-30, 26]. Пробой воздуха в виде 1-3 очагов лазерной плазмы («лазерных искр») вблизи фокуса линзы удавалось получать при фокусировке лазерного излучения с мощностью  $\approx 10^8\text{Вт}$ , используя линзы с фокусным расстоянием до  $\approx 0,5\text{м}$  [27-30, 26]. При фокусировке излучения с мощностью  $\approx 10^9\text{Вт}$  с выхода неодимовой лазерной установки рис.1г линзой с фокусом  $\approx 3\text{м}$  нами наблюдался оптический пробой воздуха длиной около  $4\text{м}$ , рис.2 [2,5]. Это было первое наблюдение так называемой «длинной лазерной искры» - протяженной области пробоя, состоявшей из множества отдельных «искр». Наблюдениям и исследованиям «длинной лазерной искры» были посвящены в дальнейшем работы [31,32] и другие публикации.

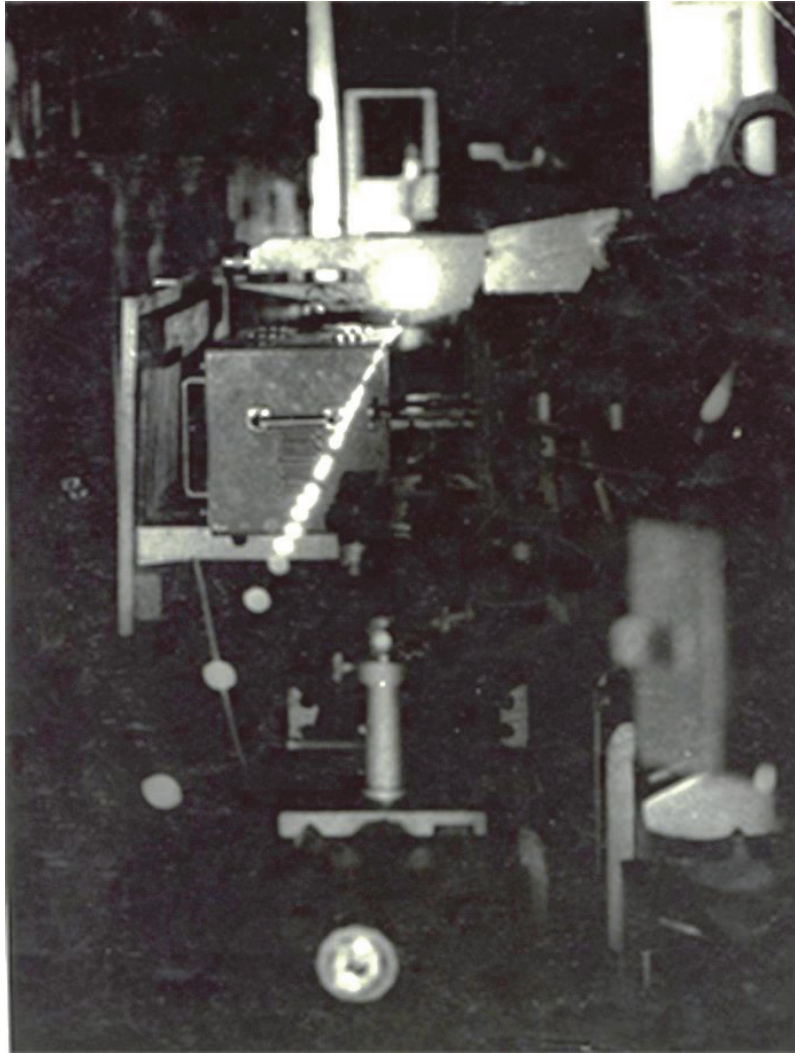


Рис.2. Фотография «длинной лазерной искры» - области оптического пробоя протяженностью около 4м, возникавшей в воздухе при фокусировке линзой с фокусом  $\approx 3$ м импульса излучения с мощностью  $\approx 1$ ГВт с выхода лазерной установки на неодимовом стекле (павильон лаборатории квантовой радиофизики,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

Для проверки быстродействия пленочного затвора был поставлен дополнительный эксперимент, рис.3. На затвор направлялся  $\approx 20$ нс импульс с энергией 1-2Дж от генератора с модуляцией добротности ячейкой Керра (плотность мощности до  $10^8$ Вт/см<sup>2</sup>) [26], рис. 3а. Было установлено, что при плотности энергии в импульсе  $\varepsilon < \varepsilon_{кр} \approx 0,4$ Дж/см<sup>2</sup> ( $\varepsilon_{кр}$  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 на  $Al$  пленке площадки  $1\text{см}^2$  и толщиной  $0,05\text{мкм}$ . Оценка показала, что  $\varepsilon_{кр} \approx 0,4\text{Дж/см}^2$  соответствует энергии, необходимой (с учетом отражения) для испарения  $1\text{см}^2$  слоя пленки. При  $\varepsilon < \varepsilon_{кр}$  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  $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$ . При этом, если плотность энергии начального участка не достигает критической величины, пленочный затвор задерживает эту часть импульса. С ростом интенсивности импульса условие  $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$  выполняется, затвор просветляется, и основная часть импульса проходит затвор с малыми потерями

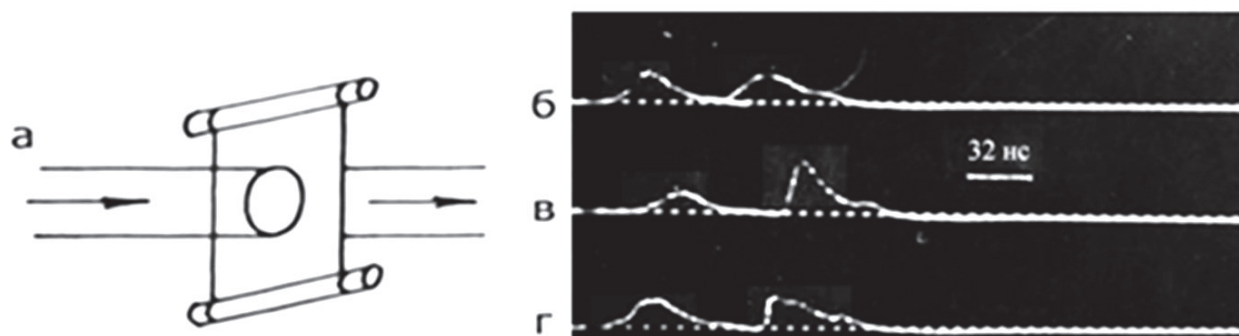


Рис.3. Схема формирования импульса генератора с модулированной добротностью затвором на основе  $Al$  пленки «майлар» (а) и осциллограммы импульсов до (слева) и после (справа) прохождения затвора и оптической задержки: прожигание  $Al$  пленки полным сечением пучка (б) и через диафрагмы  $\varnothing 5\text{мм}$  (в) и  $\varnothing 1,5\text{мм}$  (г).

Испарение  $Al$  пленки при  $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$  осуществлялось как полным пучком генератора диаметром около  $\varnothing 10\text{мм}$  (без ограничения диафрагмой), так и через диафрагмы  $\varnothing 5\text{мм}$  и  $\varnothing 1,5\text{мм}$ , 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.3в,



г. При облучении плёнки пучком со всего торца активного элемента длительность переднего фронта импульса после затвора практически не сокращалась, рис.3б. В то же время, при облучении плёнки пучком, который прошёл через диафрагму  $\varnothing 1,5\text{мм}$ , фронт прошедшего импульса обострялся до  $\approx 1\text{нс}$ , как показано на осциллограмме рис.3г.

### 3. Обсуждение результатов эксперимента и выводы

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.3б. Напротив, при облучении затвора излучением только от небольшого участка активной среды (через диафрагму) наблюдалось обострение переднего фронта и сокращение длительности импульса, рис.3в, г. Передний фронт с длительностью  $\approx 1\text{нс}$  после диафрагмы  $\varnothing 1,5\text{мм}$  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  $\varnothing 30\text{мм}$ , направлявшемся на пленку в лазерной системе на активных элементах  $\varnothing 30 \times 600\text{мм}$  (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

[7,33], в которых были зарегистрированы прошедшие пленку лазерные импульсы с крутизной переднего фронта до 10нс.

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 вследствие фазового перехода металл-диэлектрик [34]. 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. В работах [18,19,22,24] было обнаружено селективное испарение расплава в кратере при лазерной абляции, которое не было бы возможным без волны просветления [11]. Условия существования «волны просветления», распространяющейся от поверхности вглубь *Al* мишени, по данным экспериментов и расчетов соответствуют диапазону интенсивностей излучения  $10^6$ - $10^8$ Вт/см<sup>2</sup> [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 30нс импульсами неодимового лазера. Оценка скорости распространения волны просветления по данным регистрации импульсов ультрафиолетового излучения, прошедших фольгу, дала среднюю скорость волны просветления  $5 \times 10^4$ см/с. Используя в наших экспериментах с *Al* пленкой [2,5] уровень плотности мощности  $10^7$ - $10^8$ Вт/см<sup>2</sup> 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 *Al* пленки в нашем эксперименте. Время

распространения «волны просветления» через слой  $Al$  толщиной  $5 \times 10^{-6}$  см на пленке составляет  $\approx 10^{-10}$  с. Такая высокая скорость просветления могла сформировать у импульса неодимового лазера, прошедшего пленочный затвор, передний фронт (рис.3г), длительность которого  $\approx 1$  нс ограничивалась временным разрешением тракта регистрации.

Таким образом, полученные в наших экспериментах с пленкой «майлар» экспериментальные данные по формированию короткого переднего фронта лазерного импульса [2,5] свидетельствуют в пользу срабатывания механизма «волны просветления» [11], возникающей вследствие фазового перехода металл-диэлектрик в слое  $Al$  на пленке при облучении ее лазерным пучком. При интенсивности лазерного излучения  $10^7$ - $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, 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 ( $\leq 1$  нс) фрагмента из лазерного импульса. Интерес к тонким металлическим пленкам проявлялся в связи с возможностью их применения в качестве коммутаторов излучения СВЧ [33], для защиты оптических устройств, работающих с лазерными пучками [35] и др.

Ю.В. Сенатский благодарит С.М. Першина за полезные обсуждения результатов работы.

#### 4. Список литературы

- [1] D. Grant. Proc. of the IEEE **51**,604 (1963).
- [2] Н.Г.Басов, Р.В. Амбарцумян, Б.Л. Борович, В.С.Зуев, П.Г.Крюков, В.С.Летохов, В.М.Морозов, А.Н. Ораевский, Ю.В.Сенатский, Ю.Ю.Стойлов, В.А. Щеглов. Отчет о НИР по теме «1Б». Москва. ФИАН (1966).
- [3] Ю.А. Калинин, А.И. Степанов. Опт.- мех. пром., вып.7, 59 (1968).
- [4] J.F. Asmus. Appl. Optics **8**, 1252 (1969).
- [5] Ю.В. Сенатский. Диссертация канд. физ.- мат. наук. Москва. ФИАН (1970).
- [6] П.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский. Препринт ФИАН №51 (1971).
- [7] М.П. Ванюков, В.И. Исаенко, П.П. Пашинин, В.А. Серебряков, В.Н. Сизов, А.Д. Стариков. Сборник “Квантовая электроника” под ред. акад. Н.Г. Басова, вып.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. Аскаръян, 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.Mahdieh, H. Hosseini Shokoh. Appl. Phys. A **106**, 995 (2012).
- [24] С.М. Першин, В.Н. Леднев, Д.Д. Богаткин, Т.А. Лабутин, А.Ф. Бункин. 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.С. Зуев, Ю.В. Сенатский. Письма в ЖЭТФ **2**, 57 (1965).
- [27] R.G. Meyerand, A.F. Naught. Phys. Rev. Lett. **11**, 401 (1963).
- [28] С.Л. Мандельштам, П.П. Пашинин, А.В. Прохиндеев, А.М. Прохоров, Н.К. Суходрев. ЖЭТФ **47**, 2003 (1964).
- [29] Н.Г. Басов, В.С. Зуев, Ю.В. Сенатский. ЖЭТФ **48**,1562 (1965).

- [30] Р.В. Амбарцумян, Н.Г. Басов, В.А. Бойко, В.С. Зуев, О.Н. Крохин, П.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский, Ю.Ю. Стойлов. ЖЭТФ **48**, 1583(1965).
- [31] Н.Г. Басов, В.А. Бойко, О.Н. Крохин, Г.В. Склизков. Доклады АН СССР **173**, 538 (1967).
- [32] W. F. Hagen. J. Appl. Phys. **40**, 511(1969).
- [33] Г.А. Аскарьян, Н.М. Тарасова. Письма в ЖЭТФ **18**, 8 (1973).
- [34] Я.Б. Зельдович, Л.Д. Ландау. ЖЭТФ **14**, 32 (1944).
- [35] V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, and V. B. Shlishevskii. J. Opt. Technol. **78** (6), 377 (2011).

Подписано в печать 27.01.2015 г.  
Формат 60x84/16. Заказ № 3. Тираж 140 экз. П.л 1.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640