

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ЗАТВОРА ПОККЕЛЬСА РЕВЕРСОРА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Т. Ю. Коженкова, С. В. Тютин, Д. А. Чапарин, Д. Н. Синявин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В разрабатываемых в РФЯЦ ВНИИЭФ лазерных установках широкое применение находят оптические затворы на основе ячеек Поккельса. С помощью этих затворов удается избежать неконтролируемого самовозбуждения мощных усилительных каскадов установок и генерировать лазерное излучение с требуемыми характеристиками.

В настоящее время в состав установки «Луч» входит затвор апертурой 100 мм [1], а создаваемая лазерная установка нового поколения потребует оснащения ее затворами еще большей апертуры – 200 мм или даже 400 мм.

В качестве затворов в лазерных системах, как правило, используются ячейки Поккельса на основе кристаллов дигидрофосфата калия КДП ( $\text{KN}_2\text{PO}_4$ ) [2], помещенные между двумя скрещенными поляризаторами. По мере развития лазерных установок стало понятно, что конструкция классической ячейки Поккельса, представляющая собой цилиндрический кристалл с нанесенными вблизи торцов на боковую поверхность кольцевыми электродами, не может быть применена для широкоапертурных лазерных пучков. Изготовление ячеек Поккельса диаметром  $D > 100$  мм традиционным способом связано с необходимостью выращивания кристаллов длиной  $L > 130$  мм. Только при выполнении этого требования ( $L > 1,3D$ ) обеспечивается однородность электрического поля внутри кристалла. Качество кристаллов при этом зачастую оказывается недостаточно высоким, что сказывается на характеристиках затвора, в частности, на величине его контраста и коэффициента пропускания.

Для обеспечения однородности электрического поля внутри кристалла была предложена концепция ячейки Поккельса с плазменными электродами [3], которая работает в одноимпульсном режиме [4]. Основная идея заключается в замене кольцевых металлических электродов на плазменные, прозрачные для лазерного излучения, расположенные на торцевой поверхности кристалла. В такой конструкции длина кристалла не связана с его диаметром, поскольку однородность электрического поля внутри кристалла обеспечивается торцевым расположением электродов. В одноимпульсном режиме генерация плазмы и формирование однородного поля внутри кристалла в результате поляризации плазмы происходят под дей-

ствием управляющего импульса. Особенностью этого режима работы ячеек является задержка начала временного окна пропускания излучения затвором по отношению к началу импульса напряжения, обусловленная временем формирования газоразрядной плазмы внутри камеры.

Цель работы – экспериментальное исследование характеристик ячейки Поккельса с плазменными электродами, работающей в режиме без предварительной ионизации плазменных камер, формирующих проводящие электроды на поверхности электрооптического кристалла.

Эксперименты проводились на специально созданном стенде. Управление работой стенда производилась при помощи автоматизированной системой управления (АСУ)

В экспериментах применялись два типа лазеров: непрерывный ИК – лазер и импульсный лазер на неодимовом стекле, длительностью импульса  $\sim (20-25)$  нс и энергией до 200 мДж. Добротность резонатора в импульсном лазере модулировалась внутррезонаторным затвором Поккельса, что позволяло не только точно фиксировать момент генерации лазерного импульса, но и сканировать им во времени. Синхронизация работы импульсного лазера и ячейки Поккельса осуществлялась генератором импульсов, с помощью которого с необходимой временной задержкой формировались электрические и оптические импульсы. Выбранные величины задержек учитывали время распространения сигналов по кабельным и оптическим линиям передачи запускающих импульсов.

В процессе проведения экспериментов с затвором были измерены:

1. Коэффициенты пропускания оптических элементов затвора;
2. Временные характеристики напряжения генератора управляющих импульсов;
3. Характеристики временного окна пропускания затвора в режиме без предионизации;
4. Оптическая эффективность ячейки.

## 1. Результаты экспериментов

### 1.1. Коэффициенты пропускания оптических элементов затвора

Коэффициент пропускания ячейки измерялся в трех областях апертуры кристалла КДП: по центру

кристалла и вблизи электродов плазменных камер. Перемещение ячейки Поккельса по двум координатам  $y$  и  $z$ , осуществлялось при помощи перемещателя (см. рис. 1), обеспечивающий перемещение по всей световой апертуре ячейки. Управление перемещателем происходит в автоматическом режиме АСУ, с точностью позиционирования 1 мм по двум степеням свободы. Данный перемещатель значительно сокращает затрачиваемое время на перемещение и ориентацию ячейки Поккельса по исследуемой апертуре кристалла и повышает точность получаемых данных.

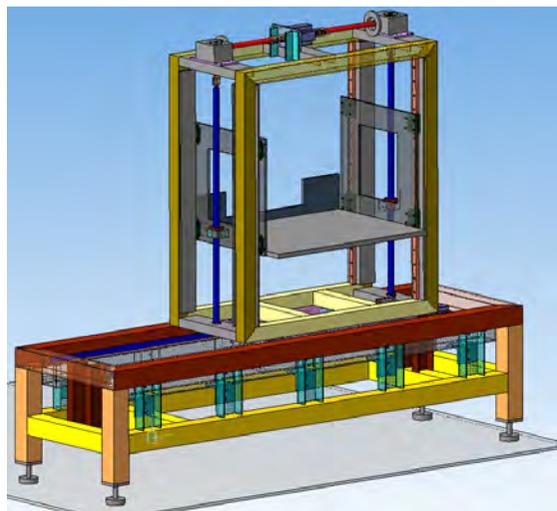


Рис. 1. Двухкоординатный перемещатель ячейки Поккельса

Во всех сериях измерений вычислялись коэффициенты пропускания каждого из элементов затвора. Результаты измеренных коэффициентов пропускания оптических элементов и расчетный коэффициент пропускания ячейки, рассчитанные по формулам Френеля, приведены в табл. 1.

Обращает на себя внимание меньшее значение пропускания ячейки с ее правой (катодной) стороны, где размещены электроды зиммера. Определение причин уменьшения пропускания требует дополнительных исследований. В их числе можно предположить плохое просветление окон ячейки или распыление материала электродов катода и зиммера и соответствующее загрязнение окон или кристалла ячейки.

## 1.2. Временные характеристики выходного напряжения генератора управляющих импульсов (ГУИ)

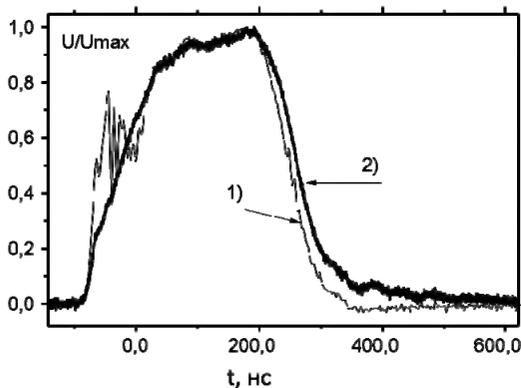
В экспериментах измерялись амплитуда и форма импульса выходного напряжения ГУИ и временная задержка между запускающим импульсом и выходным напряжением генератора ГУИ. Последняя характеристика важна для определения момента запуска ГУИ системой синхронизации установки нового поколения. Нагрузкой ГУИ служили плазменные камеры ячейки, заполненные смесью газов гелия и кислорода с давлением смеси  $\sim 10$  Торр.

Форма импульса ГУИ при нагрузке на плазменные камеры для режима с предварительной и без предварительной ионизации плазменных камер, представлена на рис. 2.

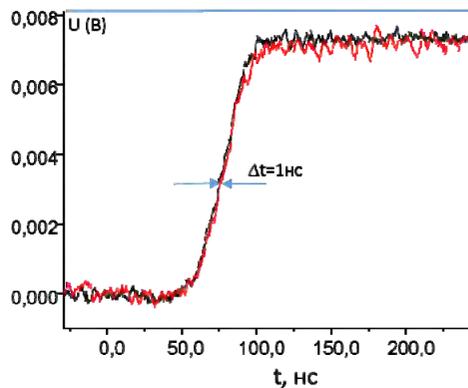
Таблица 1

Значение коэффициентов пропускания оптических элементов затвора Поккельса

Оптический элемент	Первый поляризатор	Второй поляризатор	Ячейка Поккельса			Расчетный коэффициент пропускания ячейки
			Правая сторона	Центр	Левая сторона	
Коэффициент пропускания, %	$99 \pm 3$	$99 \pm 3$	$71 \pm 4$	$84 \pm 3$	$81 \pm 4$	84,1



а



б

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения ГУИ: а – нормированная форма импульса ГУИ при нагрузке на плазменные камеры ячейки для режима с предварительной (2) и без предварительной ионизации (1) плазменных камер, б – разновременность импульсов запуска ГУИ и реперного импульса

Различие в форме импульсов напряжения на ячейке связано с различными режимами работы ячейки. На осциллограммах, представленных на рисунке 6а) видно, что разница в форме импульсов имеет место на их переднем фронте в течении первых ста наносекунд, после чего форма импульсов для обоих режимов практически совпадает. В отсутствии предварительной ионизации в начальный момент подачи напряжения на ячейку сопротивление нагрузки ГУИ бесконечно большое и остается таковым до момента пробоя газа в плазменных камерах. Это и объясняет наличие выброса на переднем фронте. После того, как пробой произошел, нагрузка ГУИ одинаковая при обоих режимах работы ячейки и формы импульсов напряжения ГУИ для них совпадают. Поскольку лазерный импульс должен поступать на затвор вблизи максимального значения напряжения на ячейке (в момент полуволнового значения напряжения), то, с этой точки зрения, оба режима эквивалентны. Можно ожидать, что различие должно и будет проявляться только во временной задержке между моментом подачи высоковольтного импульса на ячейку и началом формирования временного окна пропускания затвора.

### 1.3 Временные характеристики окна пропускания затвора в режиме без предионизации

При измерении временных характеристик окна пропускания затвора с ячейкой Поккельса с плазменными электродами основное внимание уделялось определению задержки между началом высоковольтного импульса ГУИ и временным окном пропускания затвора в разных областях апертуры ячейки.

В экспериментах осциллографически регистрировались два сигнала: высоковольтный импульс ГУИ и излучение непрерывного лазера, прошедшее через затвор при подаче на электроды плазменных камер напряжения ГУИ. Измерения проводились в различных областях в пределах апертуры кристалла ячейки.

Схема измерений показана на рис. 3.

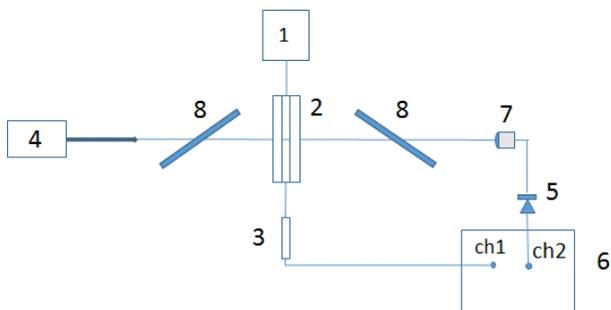
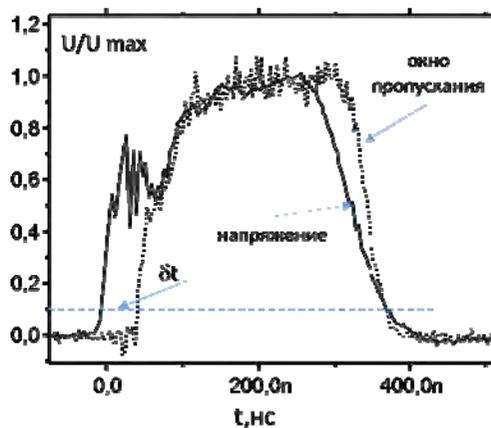


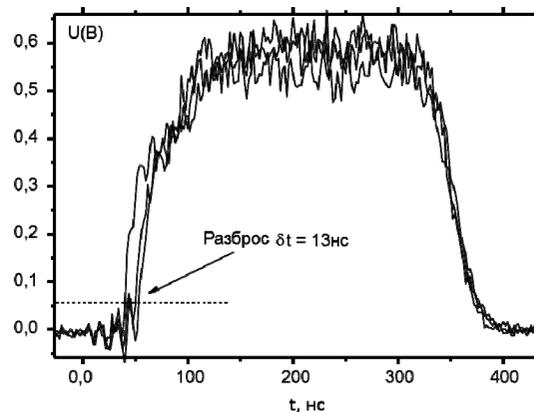
Рис. 3. Схема измерения временных характеристик окна пропускания затвора: 1 – генератор управляющих импульсов, 2 – ячейка Поккельса, 3 – высоковольтный делитель, 4 – непрерывный лазер ( $\lambda = 1,053$  мкм), 5 – фотодиод, 6 – осциллограф, 7 – объектив, 8 – поляризаторы

Результаты проведенных измерений приведены на рис. 4 и в табл. 2. Длительность временного окна

пропускания затвора по уровню 0,5 равна 250 нс, длительность переднего и заднего фронтов равны соответственно 65 нс и 50 нс. Временная задержка ( $\delta t$ ) между импульсами напряжения ГУИ началом окна пропускания затвора измерялась по уровню 0,1 от их максимальной амплитуды. Приведенные в табл. 2 величины временной задержки представляют собой значения, усредненные по десяти включениям ячейки.



а



б

Рис. 4. Осциллограммы импульсов высокого напряжения ГУИ и временного окна пропускания затвора: а – типичные осциллограммы импульсов, б – максимальный разброс осциллограмм временного окна пропускания затвора в пределах апертуры ячейки

Из представленных результатов видно, что временная задержка между высоковольтным импульсом ГУИ и началом формирования временного окна пропускания затвора возрастает к середине апертуры ячейки примерно на десять наносекунд. Временная задержка между лазерными импульсами на прямом и обратном проходах через затвор реверсора в установке нового поколения составляет также величину порядка десяти наносекунд, поэтому надлежащим выбором момента запуска ГУИ можно осуществить эффективную работу затвора реверсора на обоих проходах лазерного импульса.

Временная задержка между высоковольтным импульсом ГУИ и началом формирования временного окна пропускания затвора Поக்கельса

Область регистрации на апертуре ячейки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{\text{гуй}}, \text{нс}$	-5,6	-5,7±0,5	-5,4±1	-4,9±1	-5,4±0,1	-5±0,5	-5,8±1	-5,6±1	-5,35±1
$t_{\text{окна}}, \text{нс}$	41,9±1,3	41,5±1	40,7±0,7	52,6±1	53,5±1	53±0,7	49,1±1,5	51±1	51,4±1
$\delta t, \text{нс}^*)$	44,4±1,3	44,1±1,5	43,05±1,7	54,4±2	55,8±1,1	54,9±1,2	51,9±2,5	53,5±2	53,65±2
Область регистрации	электроды			середина ячейки			электроды вблизи зиммера		

\*) учтена задержка в измерительных цепях.  
 $t_{\text{гуй}}, t_{\text{окна}}$  – момент регистрации импульсов по осциллограмме,  $\delta t$  – временная задержка между импульсами.

## 2. Оптическая эффективность ячейки

Важной характеристикой реверсора является коэффициент пропускания, поскольку он влияет на общую энергетику установки. Его величина зависит от коэффициентов отражения зеркал, входящих в состав реверсора, и коэффициента пропускания затвора Поக்கельса, состоящего из двух скрещенных поляризаторов и ячейки.

Коэффициент пропускания затвора на одном проходе при подаче на него полуволнового напряжения можно представить следующим образом:

$$T_{\text{затв}} = T_{\text{П1}} \times T_{\text{П2}} \times T_{\text{Я}}^{\text{ФР}} \times h, \quad (1)$$

где  $T_{\text{П1}}, T_{\text{П2}}, T_{\text{Я}}^{\text{ФР}}$  – френелевские потери на элементах затвора (поляризаторах и ячейке Поக்கельса).  $h$  – оптическая эффективность ячейки – величина, характеризующая точность поворота плоскости поляризации проходящего на нее излучения на  $90^\circ$ , и влияющая на потери излучения при проходе через поляризатор П2.

Технология изготовления поляризаторов позволяет в лучших образцах получать коэффициент пропускания от 98 % до 99 %. Учитывая, что лазерное излучение проходит через затвор дважды, основной вклад в потери энергии в реверсоре вносят френелевские потери в ячейке Поக்கельса и ее оптическая эффективность.

На величину оптической эффективности влияет возможная деполаризация излучения, проходящего через ячейку (оптические окна + кристалл) и точность выставления полуволнового управляющего напряжения, подаваемого на кристалл. В идеальном случае, при подаче полуволнового напряжения на кристалл ячейки, пропускание затвора должно определяться только френелевскими потерями на входящих в него оптических элементах.

Определение оптической эффективности состояла в том, что бы измерить коэффициент пропускания затвора при подаче на ячейку Поக்கельса полуволнового напряжения и сравнения полученного значения с измеренным ранее суммарным пропусканием элементов затвора. С помощью лазерного пуч-

ка размером  $35 \times 35$  мм оптическая эффективность измерялась в различных областях световой апертуры кристалла размером  $140 \times 140$  мм, показанных на рис. 5. Коэффициенты пропускания затвора при подаче на ячейку полуволнового напряжения приведены в табл. 3. Изменение оптической эффективности ячейки в пределах апертуры представлено на рис. 6.

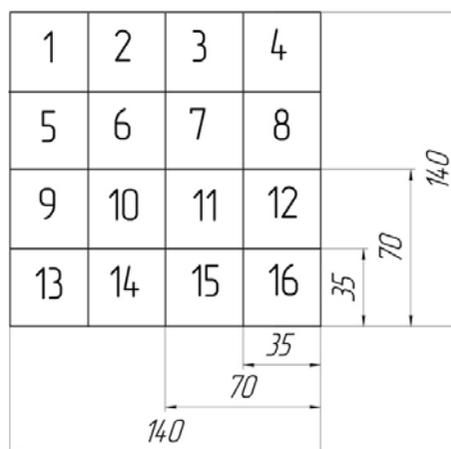


Рис. 5. Области измерения оптической эффективности в пределах апертуры ячейки

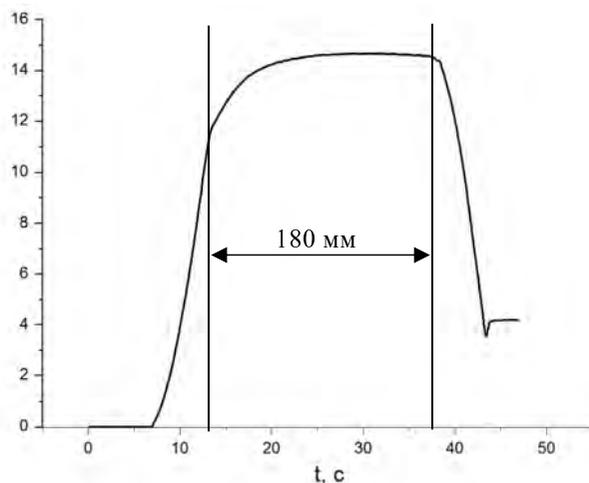


Рис. 6. Изменение оптической эффективности ячейки в пределах апертуры

Коэффициенты пропускания затвора при подаче на ячейку полуволнового напряжения

Область измерений	Тзатв. %						
1	82,6	2	80,6	3	79,3	4	74,8
5	80,6	6	80,6	7	79,3	8	68,7
9	80,4	10	80,4	11	79,3	12	70,7
13	79,7	14	79,7	15	78,7	16	74,1

Если сравнивать полученные значения (табл. 3) коэффициента пропускания затвора при подаче на ячейку полуволнового напряжения с френелевскими потерями на отдельных элементах, то оптическая эффективность ячейки  $h = T_{\text{затв}} / (T_{\text{П1}} \times T_{\text{П2}} \times T_{\text{Я}}^{\text{ФР}})$  в пределах апертуры ячейки равна  $h = (95-98)\%$ . Учитывая, что точность калориметрических измерений составляет  $(\pm 3)\%$  это является вполне удовлетворительным результатом.

### Заключение

1. Проведены экспериментальные исследования оптического затвора апертурой 180 мм, входящего в состав оптического затвора реверсора установки нового поколения в режиме без предварительной ионизации плазменных камер ячейки Поккельса.

2. Измерена временная задержка между импульсом запуска и импульсом выходного напряжения генератора управляющего импульса. Из полученных данных видна высокая стабильность временной внутренней задержки в ГУИ, что принципиально важно для надежной синхронизации работы затвора Поккельса в составе установки нового поколения.

3. Проведено сравнение формы импульсов напряжения генератора управляющего импульса в режимах с преионизацией и без преионизации плазменных камер ячейки Поккельса. Поскольку лазерный импульс на затвор должен поступать вблизи максимального значения напряжения на ячейке (в момент полуволнового значения напряжения), то с этой точки зрения оба режима эквивалентны.

4. Измерены френелевские потери на оптических элементах, входящих в состав затвора.

Коэффициенты пропускания поляризаторов равны  $(99 \pm 3)\%$ , коэффициент пропускания ячейки Поккельса неоднороден по ее апертуре. Отмечено снижение коэффициента пропускания ячейки в области зиммеров, определение причин которого требует дополнительных исследований.

5. Измерены характеристики временного окна пропускания затвора в режиме без преионизации.

В пределах апертуры затвора 140×140 мм окно пропускания затвора начинает формироваться с задержкой от 43 нс до 56 нс относительно начала высоковольтного импульса ГУИ. Максимальное значение задержки соответствует центральной области затвора. Длительность временного окна пропускания затвора по уровню 0,5 равна 250 нс, длительность переднего и заднего фронтов равны соответственно 65 нс и 50 нс.

6. Оптическая эффективность ячейки  $h = T_{\text{затв}} / (T_{\text{П1}} \times T_{\text{П2}} \times T_{\text{Я}}^{\text{ФР}})$  в пределах апертуры ячейки равна  $h = (95-98)\%$ . Учитывая, что точность калориметрических измерений составляет  $(\pm 3)\%$ , это является вполне удовлетворительным результатом.

7. Показано, что ячейка Поккельса апертурой 180 мм может работать в составе реверсора установки нового поколения в режиме без преионизации, что существенно сокращает количество оборудования, необходимого для реверсора и упрощает систему управления затвором и сбор информации о его работе.

Создан автоматизированный стенд входного контроля оптических затворов.

### Литература

1. Андреев Н. Ф. Бабин А. А. Давыдов В. С., и др. Широкоапертурная ячейка Поккельса с плазменными электродами // Прикладная физика. 2010. № 6.
2. Мустель Е. Р. Парыгин В. Н, Методы модуляции и сканирования света // М.: Наука, 1970.
3. Goldhar J. and Henesian M. A. Electro-optical switches with plasma electrodes // Opt. Lett. 1984. 9, 73-75.
4. Gardelle J. and Pasini E. A simple operation of a plasma-electrode pockel's cell for the laser megajoules // Journal of Applied Physics. 2002. 91, 2631.