

УДК 621.3.038.8

## Широкоапертурная ячейка Поккельса с плазменными электродами

*Н. Ф. Андреев, А. А. Бабин, В. С. Давыдов, А. З. Матвеев, С. Г. Гаранин,  
Ю. В. Долгополов, С. М. Куликов, С. А. Сухарев, С. В. Тютин*

*Приведены результаты экспериментальных исследований широкоапертурной (100×100 мм) ячейки Поккельса с плазменными электродами (ЯППЭ). Измерены временные характеристики, величина контраста, коэффициент пропускания и оптическая однородность ячейки; эффективное полуволновое напряжение ячейки — 10 кВ; длительность временного окна пропускания ячейки регулируется в пределах 250—550 нс; длительность его переднего фронта 40—50 нс, заднего — 70—100 нс; время формирования плазменных электродов ячейки 40±5 нс.*

PACS: 42.79.Nr; 78.20.Jq

*Ключевые слова:* лазерный модуль, ячейка Поккельса, плазменные электроды.

### Введение

В разрабатываемых в настоящее время лазерных установках, предназначенных для исследований лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), высокая энергетика генерируемых пучков достигается за счет применения широкоапертурных усилительных модулей, работающих в четырехпроходном режиме.

Развязка усилительных модулей между собой и от излучения, рассеянного от объектов, на которые воздействует излучение, является одной из принципиальных задач при проведении лазерного эксперимента. С помощью элементов развязки удается избежать неконтролируемого самовозбуждения мощных усилительных каскадов установки и генерировать лазерное излучение с требуемыми характеристиками. В частности, в установке "Луч" [1]

развязка осуществляется с помощью специально разработанной схемы реверсора, оснащенного затвором Поккельса, который пропускает лазерное излучение только в момент прихода на него лазерного импульса, усиленного после первого и второго проходов. Таким образом четырехпроходная усилительная схема разбивается на две двухпроходные, что препятствует ее самовозбуждению.

В настоящее время в составе лазеров на неодимовом стекле наиболее широко применяются затворы Поккельса на основе кристаллов дигидрофосфата калия КДП ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) или соответствующего дейтерированного соединения — ДКДП.

В работе [2] приведены результаты разработки и исследования характеристик ячейки Поккельса апертурой 70 мм, изготовленной традиционным способом — кольцевые электроды на цилиндрической поверхности кристалла. В такой конструкции ячейки требуемая однородность электрического поля внутри кристалла достигается при условии  $L > 1,3D$  ( $L$ ,  $D$  — длина и диаметр кристалла). Изготовление ячеек Поккельса диаметром  $D > 100$  мм традиционным способом связано с необходимостью выращивания кристаллов длиной  $L > 130$  мм, что существенно повышает их стоимость. Качество кристаллов при этом зачастую оказывается недостаточно высоким, что сказывается на характеристиках затвора, в частности, на величине его контраста и коэффициенте пропускания.

Для того чтобы избежать этой трудности, была выдвинута концепция ячейки Поккельса с плазменными электродами (PEPC — Plasma-Electrode Pockels Cell) [3]. Основная идея заключается в замене кольцевых электродов на два плазменных, прозрачных для лазерного излучения и расположенных на торцевой поверхности кристалла. При такой конструкции ячейки длина кристалла не

---

Андреев Николай Федорович, зав. лабораторией.  
Бабин Алексей Александрович, зав. отделом.  
Давыдов Владимир Сергеевич, ведущий конструктор.  
Матвеев Александр Захарович, старший научный сотрудник.  
Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН).  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 4.  
E-mail: nandreev@appl.sci-nnov.ru  
Гаранин Сергей Григорьевич, директор.  
Долгополов Юрий Васильевич, начальник группы.  
Куликов Станислав Михайлович, начальник отдела.  
Сухарев Станислав Александрович, начальник отдела.  
Тютин Сергей Владимирович, младший научный сотрудник.  
Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ.  
Россия, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37.  
Тел. 8 (83130) 207-92. Факс 8 (83130) 219-37.  
E-mail: dolgor@otd13.vniief.ru  
E-mail: sukharev@otd13.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2010 г.

---

© Андреев Н. Ф., Бабин А. А., Давыдов В. С., Матвеев А. З.  
Гаранин С. Г., Долгополов Ю. В., Куликов С. М.,  
Сухарев С. А., Тютин С. В., 2010

связана с его диаметром, поскольку однородность электрического поля внутри кристалла обеспечивается торцевым расположением электродов. Ранее [4—6] разработка и экспериментальное исследование ячеек Поккельса с плазменными электродами проводились только на основе применения кристалла КДП. К настоящему времени подобными ячейками оснащены установки NIF (США) и LMJ (Франция).

В отличие от ячеек, применяющихся в составе установок NIF и LMJ, авторы разработали ячейки Поккельса с плазменными электродами, в которых в качестве электрооптического элемента применяется кристалл ДКДП. Его использование существенно упрощает электрическую схему питания ячейки, но, с другой стороны, вносит свои особенности в динамику процессов образования плазменных электродов и влияет на временные характеристики окна пропускания затвора. Эти параметры могут существенно сказаться на работе мощной четырехпроходной лазерной установки "Луч", предназначенной для исследования ЛТС, в которой такие электрооптические затворы применяются в системе реверсора.

Цель данной работы — экспериментальное исследование ячейки Поккельса с плазменными электродами на основе кристалла ДКДП апертурой 100 × 100 мм и оценка возможности ее использования в мощных многопроходных лазерных системах.

### Ячейка Поккельса с плазменными электродами

Общий вид ячейки с плазменными электродами и ее схематический вид показаны на рис. 1.

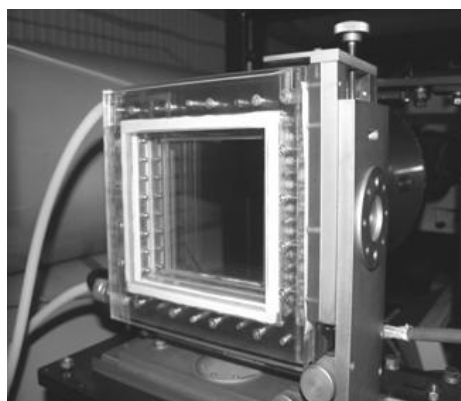
За прототип конструкции ячейки выбрана конструкция ячейки на основе кристалла КДП, разработанная для реверсора и усилительного модуля установки LMJ [6]. Отличительной особенностью нашей ячейки является использование в качестве

электрооптического элемента кристалл ДКДП, электрооптический коэффициент  $r_{63}$  которого в 2,5 раза больше, чем в кристалле КДП. Это позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить вес и габаритные размеры генератора управляющих импульсов ячейки Поккельса и всю остальную высоковольтную систему электропитания ячейки. Диэлектрическая постоянная  $\epsilon$  у кристалла ДКДП также в 2,5 раза больше, и это приводит к нежелательному увеличению емкости ячейки, что, впрочем, оказалось не столь существенным.

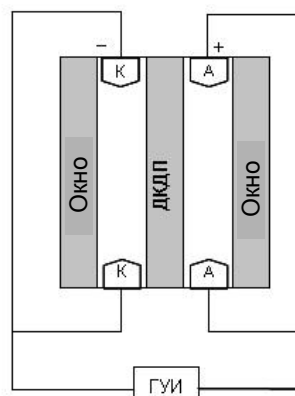
Пространства между боковыми поверхностями кристалла и оптическими окнами образуют плазменные камеры, заполняемые смесью газов гелия и кислорода в процентном соотношении 99 % гелия и 1 % кислорода при общем давлении смеси 10 Торр [6].

Под действием высоковольтных импульсов в разрядных промежутках между электродами плазменных камер происходит ионизация газа и возникает плазма, которая делает внутренние полости корпуса, находящиеся по обе стороны кристалла, токопроводящими, т. е. формируются плазменные торцевые электроды. Возможны два режима работы ячейки — с предыонизацией плазменных камер и без предыонизации.

В первом случае плазменные электроды образуются путем предварительного разряда в камерах под действием высоковольтных импульсов амплитудой до 7 кВ, длительностью от 20 до 25 мкс и направлением электрического поля перпендикулярно оптической оси кристалла. Перед приходом на ячейку лазерного импульса на созданные таким образом электроды подается высоковольтный управляющий импульс, электрическое поле которого направлено вдоль оптической оси кристалла ДКДП (продольный эффект Поккельса). Такой режим требует оснащения ячейки двумя генераторами импульсов предыонизации и генератором управляющих импульсов (ГУИ).



а



б

Рис. 1. Ячейка Поккельса с плазменными электродами:

а — общий вид ячейки; б — схематический вид ячейки для режима работы без предыонизации

Во втором случае, плазменные электроды образуются непосредственно под воздействием импульса управляющего напряжения. В этом случае отпадает необходимость в двух генераторах импульсов предварительной ионизации, что существенно упрощает электрическую схему ячейки. В [6] было показано, что различие в работе ячейки для этих двух режимов заключается в том, что в режиме без предыонизации момент открытия ячейки задержан относительно начала электрического импульса, подаваемого на ячейку. Это время необходимо для пробоя плазменных камер и формирования плазменных электродов. Ниже приводим результаты исследований режима работы ячейки без предыонизации, который привлекателен тем, что, помимо вышеперечисленного, отсутствуют большие токи между электродами в плазменных камерах. В таком режиме практически не наблюдается распыления электродов, что, в конечном итоге, может значительно увеличить ресурс работы ячейки.

Система газообеспечения плазменных камер состоит из блока откачки и напуска и системы управления. Блок откачки и напуска обеспечивает откачку внутреннего объема камер до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. и последующее заполнение камеры рабочей газовой смесью.

Генератор управляющих импульсов генерирует высоковольтные электрические импульсы отрицательной полярности амплитудой от 4,5 до 10,5 кВ. Длительность этого импульса регулируется в пределах от 100 до 500 нс, длительности переднего и заднего фронтов по уровню от 0,1 до 0,9  $U_{\max}$  равны, соответственно,  $15 \pm 2$  и  $40 \pm 3$  нс.

### Схема измерений

Измерение характеристик ячейки проводилось путем ее зондирования лазерным излучением с помощью схемы, показанной на рис. 2.

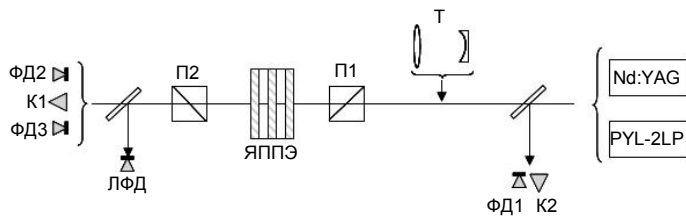


Рис. 2. Оптическая схема измерений:

Nd:YAG — импульсно-периодический лазер;  
PYL-2LP — иттербиевый волоконный лазер; П1, П2 — поляризаторы (призмы Глана); ЯППЭ — ячейка Погкельса с плазменными электродами; Т — расширяющий телескоп;  
ФД1, ФД2 — фотодиоды ФД100; ФД3 — фотодиод D400FC;  
ЛФД — лавинный фотодиод; К1, К2 — калориметры

Ячейка располагалась между двумя поляризаторами П1 и П2 (призмами Глана). При необходи-

мости призмы Глана могли ориентироваться либо скрещенным образом друг относительно друга, либо параллельным. Зондирование ячейки проводилось в различных режимах — в импульсном и непрерывном. В первом случае применялся импульсный Nd:YAG-лазер, причем диаметр его выходного пучка мог с помощью расширяющего телескопа Т изменяться от 2 до 40 мм, а длительность импульса выходного излучения от 40 до 500 нс. При увеличении диаметра пучка до 40 мм призмы Глана заменялись тонкопленочными поляризаторами. Во втором режиме применялся иттербиевый волоконный лазер непрерывного излучения PYL-2LP. Количественные измерения проводились с помощью фотодиодов и калориметров. Временные характеристики регистрировались осциллографом Tektronix 3054D.

### Полуволновое напряжение

Известно [7], что коэффициент пропускания затвора, состоящего из двух скрещенных поляризаторов и помещенной между ними ячейки Погкельса, определяется следующей формулой:

$$T = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (1)$$

где  $\tilde{A} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} V$  — разность фаз между ортогональными поляризациями световой волны на выходе кристалла;

$V$  — напряжение, приложенное к кристаллу;

$r_{63}$  — электрооптический коэффициент кристалла;

$n_0$  — показатель преломления для обыкновенной волны;

$\lambda$  — длина волны излучения.

Напряжение, при котором коэффициент пропускания максимален, соответствует значению  $\Gamma = \pi$ , называется полуволновым напряжением и определяется из (1) как:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n_0^3 r_{63}}. \quad (2)$$

Для кристаллов ДКДП  $r_{63} = (26-27) \cdot 10^{-10}$  см/В, значение показателя преломления  $n_0$  для длины волны  $\lambda = 1,053$  мкм равно  $n_0 = 1,505$  [8, 9], отсюда значение  $V_{\pi} = 5,7-5,9$  кВ.

Экспериментально определенное значение эффективного полуволнового напряжения для режима работы ячейки без предыонизации равно 10 кВ. Это больше расчетного значения, но надо иметь в виду, что в ячейке заряжаются три последовательно соединенных емкости: емкость кристалла и две

дополнительные емкости между поверхностями кристалла и плазмы (емкость плазменных электродов). В режиме с предыонизацией емкости плазменных электродов из-за уменьшения расстояния между поверхностями кристалла и плазмы увеличиваются и соответственно эффективное полуволновое напряжение будет несколько меньше.

### Оптическая однородность, контраст и коэффициент пропускания ячейки

Распределение коэффициента пропускания по сечению кристалла для случая, когда он помещен в скрещенные поляризаторы и на него не подается напряжение, характеризует оптические неоднородности, которые определяются качеством кристалла. Эта величина для случая идеальных поляризаторов определяет предельно достижимое значение контраста для ячейки. Измерения проводились с помощью импульсного лазера с диаметром лазерного пучка  $d = 2$  мм, что позволяло измерять значение коэффициента пропускания в различных точках по сечению кристалла. Отношение энергий падающего и прошедшего через ячейку излучений измерялось в каждой вспышке фотодиодами ФД1 и ФД2. Характерные распределения коэффициента пропускания в различных сечениях ячейки по оси  $y$  для этого случая приведены на рис. 3, *a*. Неоднородность, связанная с технологией изготовления кристалла, максимальна в точке  $x = y = 4$  см ( $T_{\max} = 0,84$  %). В этой точке величина контраста  $k$ , связанная с качеством кристалла, минимальна,  $k = 120$ . Среднее значение пропускания во всех остальных точках  $T_{\text{mid}} = 0,25$  %, и контраст намного превышает его минимальную величину.

Неравномерность коэффициента пропускания ячейки при подаче напряжения на кристалл определялась в двух сериях измерений. В первой серии (см. рис. 3, *б*) измерения производились, как и в предыдущем случае, в отдельных точках, но поляризаторы располагались параллельно друг другу. На величину пропускания в данном случае влияют как неоднородность кристалла, так и неоднородность электрического поля в кристалле, обусловленная в основном неоднородностью плазменных электродов. Максимальное значение неоднородности по-прежнему наблюдается в точке  $x = y = 4$  см ( $T_{\max} = 2,6$  %). Среднее по поперечному сечению кристалла значение неоднородности пропускания остается достаточно малым —  $T_{\text{mid}} = 0,31$  %, что свидетельствует о высокой однородности электрического поля в кристалле.

Во второй серии измерений ячейка располагалась между скрещенными тонкопленочными поляризаторами апертурой 170 мм и зондировалась в различных областях по ее апертуре лазерным пуч-

ком размером 40×40 мм. Эти измерения проводились для определения величины потерь, вносимых реальной схемой затвора в общие потери излучения в лазерном канале установки "Луч". Величины энергии, приходящей на затвор и прошедшей через него, регистрировались предварительно прокалиброванными калориметрами. С точностью до относительной ошибки калориметрических измерений (1 %) величина пропускания затвора определялась френелевскими потерями на его элементах.

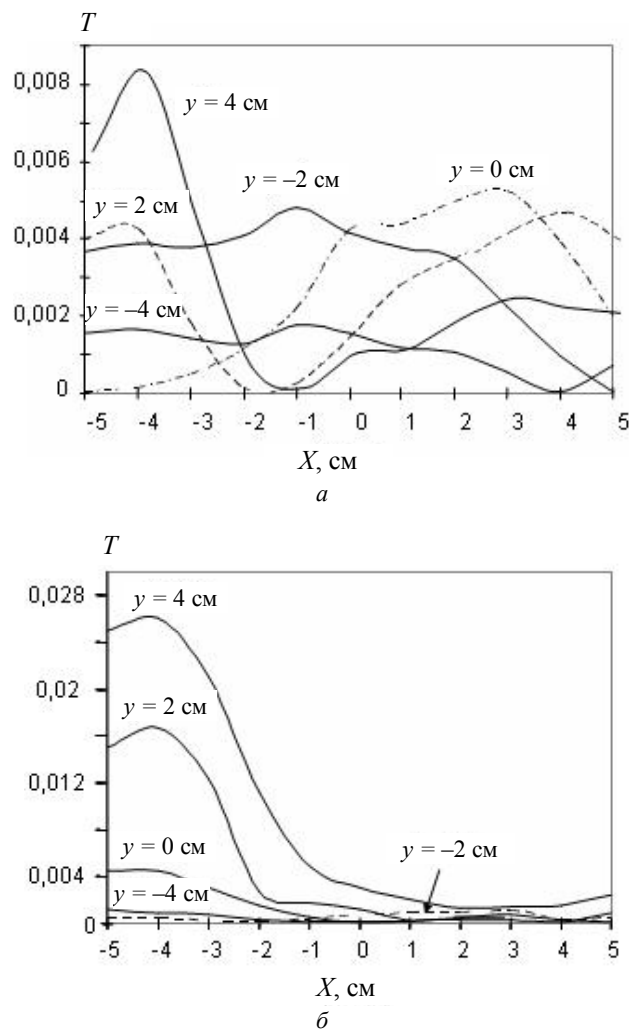


Рис. 3. Распределение коэффициента пропускания по поперечному сечению ячейки:

*a* — призмы Глана скрещены, на ячейку не подается напряжение; *б* — призмы Глана параллельны, на ячейку подается полуволновое напряжение.

Начало координат расположено в центре кристалла. Отдельные кривые соответствуют различным сечениям по оси  $y$

Оптические схемы четырехпроходных усилительных каскадов имеют ту особенность, что лазерное излучение проходит через широкоапертурные оптические затворы под различными углами к оптической оси кристалла ячейки. Это может приводить к дополнительным потерям излучения при его проходе через ячейку. Величина этих потерь зависит как от значения угла  $\theta$  между волновым

вектором лазерного излучения  $\vec{k}$  и оптической осью кристалла  $Z$ , так и от длины оптического пути излучения в кристалле. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента пропускания ЯППЭ ( $L = 1$  см) и ячейки с кольцевыми электродами ( $L = 10$  см) от угла  $\theta$ . Измерения проводились в центральной области кристалла. Для каждого значения угла  $\theta$  результаты измерений усреднялись по 10 вспышкам.

Экспериментальные данные сравнивались с расчетной зависимостью, построенной по формуле [6].

$$T(\theta) = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi L \theta^2 (n_0^2 - n_e^2)}{2\lambda n_0 n_e^2} \right], \quad (3)$$

где  $n_0$ ,  $n_e$  — показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн;

$\lambda$  — длина волны лазерного излучения.

Из приведенных результатов видно, что пропускание ячейки с плазменными электродами благодаря тому, что кристалл в ней намного тоньше, чем в ячейке с кольцевыми электродами, сохраняется на уровне, близком к единице вплоть до значения  $\theta = 1,5^\circ$ . Уменьшение величины пропускания до нуля происходит при угле  $\theta_{\max} = 4,4^\circ$  (в классической ячейке апертурой 70 мм при  $\theta_{\max} = 1,3^\circ$ ). Следствием этого является слабая критичность ячейки к разъюстировке в оптической схеме.

Величину  $\theta_{\max}$  можно оценить по коноскопической картине излучения, прошедшего через кристалл (см. рис. 4). При подаче полуволнового напряжения затвор полностью перестает пропускать излучение, волновой вектор которого составляет угол  $\theta_{\max} = \pm 4,5^\circ$  с оптической осью кристалла (угловой размер светлого поля), что практически совпадает с результатами калориметрических измерений.

### Временные характеристики

Измерения временных характеристик ячейки проводились с помощью непрерывного лазера РYL-2LP. Излучение лазера, прошедшее через ячейку, регистрировалось скоростным (разрешение 0,1 нс) фотодиодом D400FC фирмы Thorlabs. Ячейка помещалась между скрещенными призмами Глана, поэтому в отсутствие на ячейке управляющего напряжения сигнал на фотодиоде был равен нулю, а при подаче импульсного управляющего напряжения фотодиод регистрировал сигнал длительностью, равной времени открытия ячейки (окно открывания). Одновременно с окном открывания высоковольтным пробником типа Tektronix P6015A измерялся импульс, формируемый ГУИ. Оба сигнала регистрировались на осциллографе Tektronix TDS 3054D.

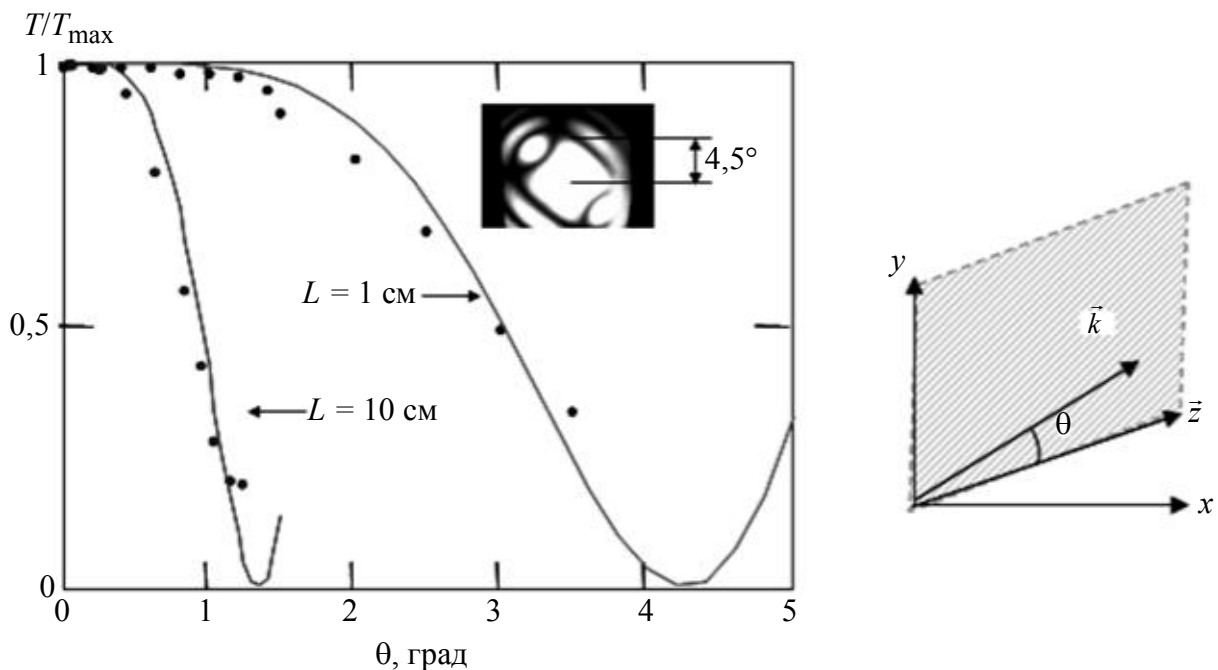


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания ЯППЭ ( $L=1$  см) и ячейки с кольцевыми электродами ( $L=10$  см) от угла  $\theta$  между оптической осью кристалла  $Z$  и направлением волнового вектора лазерного излучения  $\vec{k}$ :

• — эксперимент; — — расчетные кривые

Электрическая схема ГУИ выполнена таким образом, что на переднем фронте высоковольтного импульса формируется выброс напряжения, равный 17 кВ. Сделано это для того, чтобы уменьшить время формирования плазменных электродов и повышения стабильности их временных параметров. Выход амплитуды импульса на плато, соответствующее полуволновому напряжению, происходит примерно через 80 нс после начала импульса высоковольтного напряжения.

Измерения проводились в различных точках апертуры ячейки сериями из нескольких пусков. На рис. 5 приведена типичная осциллограмма высоковольтного управляющего импульса и временного окна пропускания затвора, которое начинает формироваться в среднем через  $40 \pm 5$  нс после начала электрического импульса, т. е. в течение этого времени в режиме без предыонизации происходит формирование плазменных электродов, для чего используется часть энергии управляющего высоковольтного импульса. Длительность переднего фронта временного окна пропускания обычно составляла 40—50 нс, заднего — 70—100 нс.

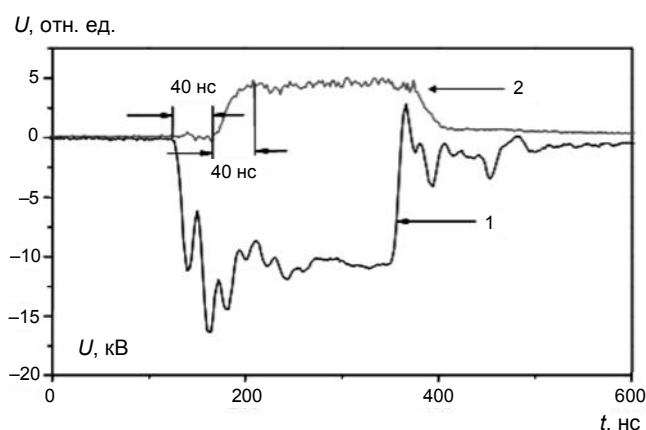


Рис. 5. Осциллограммы высоковольтного импульса ГУИ и временного окна пропускания ячейки:

1 — высоковольтный импульс; 2 — временное окно пропускания ячейки

### Заключение

Впервые исследованы характеристики разработанной нами широкоапертурной ( $100 \times 100$  мм) ЯППЭ на основе кристалла ДКДП, электрооптический коэффициент  $r_{63}$  которого в 2,5 раза больше чем в кристалле КДП, что позволяет существенно

упростить конструкцию высоковольтной системы электропитания и, как следствие, уменьшить ее вес, габаритные размеры и стоимость, что весьма важно при создании мощных многоканальных лазерных систем типа NIF (США) и LMJ (Франция).

Точность поворота этой ячейкой плоскости поляризации лазерного излучения характеризуется ее коэффициентом пропускания, который в нашем случае на всей апертуре кристалла определяется в основном только френелевскими потерями ЯППЭ. Величина коэффициента пропускания сохраняется постоянной при изменении угла между оптической осью кристалла и направлением лазерного пучка в диапазоне  $\pm 1,5$  %. Такое его поведение говорит о достаточно хорошем качестве кристалла ДКДП и высокой однородности электрического поля в нем.

Полученные результаты исследования пространственно-временных характеристик широкоапертурного электрооптического затвора с ЯППЭ на основе кристалла ДКДП, без сомнения, открывают возможность применения таких ячеек в мощных многопроходных лазерных системах.

В настоящее время разработана и проходит исследования ЯППЭ с кристаллом ДКДП апертурой  $300 \times 300$  мм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12157 офу\_м).

### Литература

1. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35(4). С. 299.
2. Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др. // Там же. 2004. Т. 34(4). С. 381.
3. Goldhar J., Henesian M. A. // Opt. Lett. 1984. V. 9. P. 73.
4. Henesian M. A., Goldhar J. // Ibid. P. 516.
5. Rodes M. A., Woods B., De Yoreo et al. // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 5312.
6. Gardelle J., Pasini E. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. No. 5. P. 2631.
7. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. // Методы модуляции и сканирования света. — М.: Наука, 1970.
8. Мак А. А., Сомс Л. Н., Фромзель Л. Н., Яшин В. Е. // Лазеры на неодимовом стекле. — М.: Наука, 1990.
9. Физическая энциклопедия/Под ред. А. М. Прохорова. — М.: Советская энциклопедия, 1988.

## Wide — aperture plasma-electrode Pockels cell

*N. F. Andreev, A. A. Babin, V. S. Davydov, A. Z. Matveev*  
Institute of Applied Physics, 4 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
E-mail: nandreev@appl.sci-nnov.ru

*S. G. Garanin, Yu. V. Dolgoplov, S. M. Kulikov, S. A. Sukharev, S. V. Tutin*  
Russian Federal Nuclear Centre — VNIIEF, 37 Mir av., Sarov, 607188, Russia  
E-mail: sukharev@otd13.vniief.ru

*We have investigated experimentally electrical and optical characteristics of the plasma-electrode Pockels cell with the 100×100 mm aperture. Time characteristics, contrast, transmission factor and optical uniformity of a cell are measured. It is shown that half-wave effective voltage of the cell is equal to 10 kV, transmission window duration can be changed from 250 up to 550 ns, rise time of leading front is 40—50 ns, fall off time of rear edge 70—100 ns. Plasma electrodes formation time is 40±5 ns.*

PACS: 42.79.Hp; 78.20.Jq

*Keywords:* laser module, Pockels cell, plasma-electrode.

Bibliography — 9 references.

*Received September 20, 2010*