

# ГЕНЕРАЦИЯ ПРЕДЫМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОХОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

А. С. Тищенко, Д. О. Замураев, А. Л. Шамраев, К. В. Сафронов, Д. С. Гаврилов, С. Ф. Ковалева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В докладе представлены результаты исследования генерации предимпульсов в многопроходных лазерных усилителях, обнаруженных при измерении временного контраста выходного импульса фемтосекундной лазерной установки СОКОЛ-Ф. Измерения отношения энергии предимпульсов к энергии основного импульса проводились при помощи быстродействующего фотодиода и абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями. Сделан вывод о том, что предимпульсы выходного усилителя не превышают порог ионизации твердотельной мишени при проведении экспериментов с интенсивностью  $>10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

## Введение

Временной контраст лазерного импульса является одним из важнейших параметров исследовательских лазерных установок. Временным контрастом принято называть отношение плотности мощности (интенсивности) основного лазерного импульса к интенсивности предшествующего ему излучения любой временной формы, будь то относительно короткие предимпульсы, либо относительно длинные «пьедесталы».

$$K = I_0/I_p,$$

где  $I_0$  – интенсивность основного импульса,  $I_p$  – интенсивность предимпульсов или пьедестала.

В контексте экспериментов по взаимодействию высокоинтенсивного излучения с веществом следует иметь в виду два важных параметра мишени: порог ионизации и порог разрушения. Ионизация зависит от плотности мощности (интенсивности) излучения и порог ионизации для металлов составляет величину, близкую к  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Разрушение мишени зависит от плотности энергии (флюенса) и для импульсов длительностью около 1 нс для металлов составляет величину порядка нескольких Дж/см<sup>2</sup> [1]. Если интенсивность излучения, предшествующего основному импульсу, превышает порог ионизации, то основной импульс будет взаимодействовать не с поверхностью мишени, а с плазмой, что существенно модифицирует механизм поглощения лазерного излучения. Превышение порога разрушения приводит к повреждению поверхности или даже разрушению мишени еще до прихода основного импульса.

Для лазерных систем с ультракороткой длительностью импульсов ( $10^{-14}$ ... $10^{-11}$  с), построенных по

схеме усиления chirпированного импульса, на нескольких пересекающихся временных интервалах можно выделить четыре основных вида излучения, предшествующего основному импульсу (рис. 1) [1, 2].

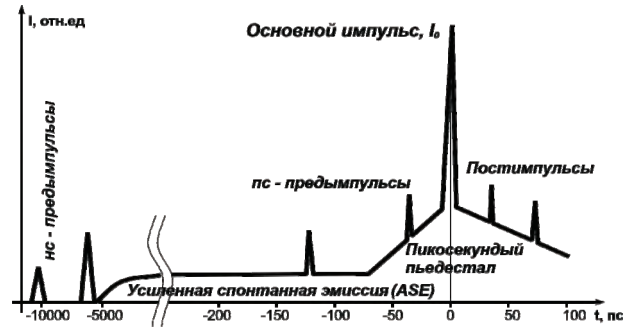


Рис. 1. Временные окрестности лазерного ультракороткого импульса (УКИ)

1. «Наносекундные» предимпульсы – импульсы с длительностью масштаба длительности основного УКИ, расположенные на временном интервале от нескольких десятков до нескольких единиц наносекунд до основного УКИ. Возникают вследствие ограниченного быстродействия и контраста оптических затворов, а также генерируются в многопроходных усилителях.

2. «Пикосекундные» предимпульсы – импульсы с длительностью масштаба длительности основного УКИ, расположенные на расстоянии десятков сотен пикосекунд до основного импульса. Генерируются в результате нелинейного взаимодействия постимпульсов с основным chirпированным импульсом в процессе усиления [3].

3. «Пикосекундный» пьедестал, начало которого становится различным на расстоянии сотни... нескольких десятков пикосекунд до основного УКИ, возникает в результате апертурного обрезания спектра в компрессоре и неточности его юстировки, влияния нескомпенсированных спектрально-фазовых модуляций высокого порядка.

4. Усиленная спонтанная эмиссия (amplified spontaneous emission, ASE), вызванная флуоресценцией «накаченных» активных элементов на различных стадиях усиления.

«Наносекундные» и «пикосекундные» предимпульсы, а также «пикосекундный» пьедестал могут приводить к ионизации вещества мишени, а усиленная спонтанная эмиссия может приводить к нагреву и повреждению поверхности твердотельной мишени и разрушению тонких фольг.

Для измерения контраста во временном диапазоне нескольких сотен пикосекунд до основного импульса, как правило, применяется кросс-коррелятор третьего порядка.

Для обнаружения предимпульсов на расстоянии от нескольких наносекунд до основного импульса используется быстродействующая фотоэлектрическая диагностика.

### Фемтосекундная лазерная установка Сокол-Ф

Настоящая работа проведена на мультитераваттной фемтосекундной лазерной установке Сокол-Ф.

Она представляет собой классический пример лазерной системы, построенной по схеме усиления чирпированного импульса (chirped pulse amplification, CPA) на основе активных элементов (АЭ) из сапфира, активированного титаном (Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti:Sa).

Оптическая структурная схема установки представлена на рис. 2.

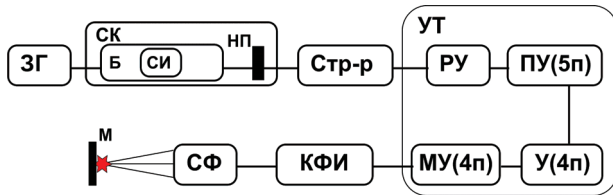


Рис. 2. Установка Сокол-Ф. Схема оптическая структурная: ЗГ – задающий генератор; Стр-р – стретчер; СФ – система фокусировки; КФИ – компрессор фемтосекундных импульсов; М – мишень; УТ – усилительный тракт: РУ – регенеративный усилитель, ПУ – предварительный усилитель, У – четырехпроходный мощный усилитель; МУ – четырехпроходный мощный усилитель; СК – система контрастирования: Б – бустер, СИ – селектор импульсов, НП – насыщающийся поглотитель

В состав установки входят: задающий генератор, стретчер, усилительный тракт, компрессор фемтосекундных импульсов, система фокусировки, которая фокусирует излучение на мишень.

В состав УТ входят четыре усилителя: регенеративный усилитель, пятипроходный предварительный усилитель, четырехпроходный усилитель и четырехпроходный мощный усилитель.

Основным отличием от классической CPA-схемы является наличие перед стретчером системы контрастирования, в состав которой входит многопроходный усилитель прямого усиления – бустер, селектор импульсов и насыщающийся поглотитель. СК эффективно подавляет спонтанную эмиссию ЗГ.

Параметры установки позволяют проводить эксперименты при интенсивности на мишени  $>10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

### Исследование наносекундного контраста

Исследования контраста в наносекундном временном диапазоне проводились в зашкальных экспе-

риментах при помощи фотодиода и набора абсорбционных светофильтров с известными оптическими плотностями. Регистрация сигнала фотодиода осуществлялась при помощи цифрового запоминающего осциллографа LeCroy WaveJet 300A. Измерения проводились при установке фотодиода на выходе КФИ. Для концентрации лазерного излучения на чувствительной площадке приемника применялось вогнутое зеркало, фильтры устанавливались в коллимированном пучке (до вогнутого зеркала). Измерения проводились без накачки выходного усилителя (МУ), все другие компоненты лазерной системы были задействованы в штатном режиме.

Длительность импульсной характеристики регистрирующей аппаратуры  $\sim 1,3$  нс FWHM (рис. 3). Поскольку, длительность импульсной характеристики значительно превышает длительность основного УКИ и любого типичного предимпульса, то амплитуды регистрируемых сигналов пропорциональны энергии УКИ и предимпульсов. Таким образом, эти измерения не позволяют судить об отношениях интенсивностей основного импульса и регистрируемых предимпульсов, но позволяют судить о соответствующих отношениях энергий. То есть для того, чтобы приписать предимпульсам некоторое значение интенсивности, кроме фотоэлектрических измерений необходимо еще измерить, или хотя бы оценить, длительность предимпульсов.

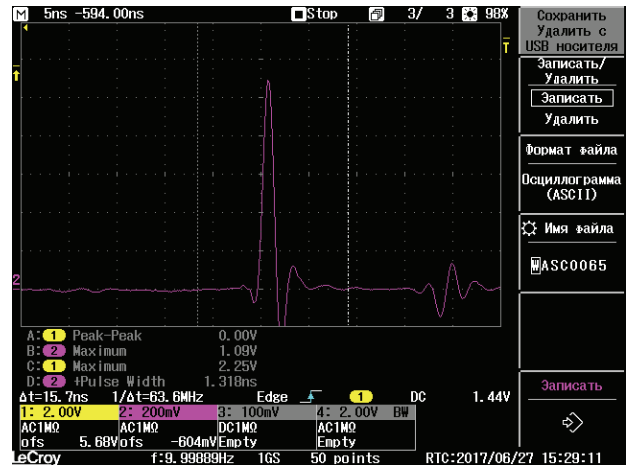


Рис. 3. Импульсная характеристика регистрирующей аппаратуры при измерении наносекундного контраста

При выполнении измерений наносекундного контраста была обнаружена сложная структура предимпульсов, локализованных на временном интервале  $\sim 32...5$  нс до основного УКИ. При исключении из оптической схемы лазера выходного четырехпроходного МУ (система накачки которого не была задействована ранее) некоторые из предимпульсов пропали. На основании этого опыта нами был сделан вывод о том, что оптические схемы многопроходных усилителей являются источником «наносекундных» предимпульсов.

## Генерация предимпульсов в многопроходных усилителях

Нам не удалось за доступное короткое время найти в литературе какого-либо достоверного описания обнаруженного эффекта генерации предимпульсов в многопроходных лазерных усилителях. Поэтому нами была предпринята попытка прояснить природу этих предимпульсов, оценить их опасность с точки зрения предионизации мишени при проведении экспериментов.

Три последних усилителя лазерной системы построены по общепринятой схеме «бабочка» (рис. 4), в состав которой входят зеркала и АЭ. Кроме этого в выходном МУ применяется криогенное охлаждение АЭ, поэтому кристалл Ti:Sa размещен внутри криостата, то есть в оптической схеме дополнительно присутствуют два оптических окна.

Для выявления источника предимпульсов, генерируемых выходным усилителем, были демонтированы окна криостата и АЭ, после чего предимпульсы, характерные для выходного усилителя, не были зарегистрированы. Последовательная установка в оптическую схему АЭ и одного за другим оптических окон привели к появлению предимпульсов. Вклад АЭ в энергию предимпульсов приблизительно вдвое меньше равного вклада каждого из двух окон. Таким образом, источником предимпульсов в многопроходном усилителе являются не зеркала, а любой преломляющий оптический элемент (кристаллический АЭ или стеклянное окно), установленный в схему усилителя.

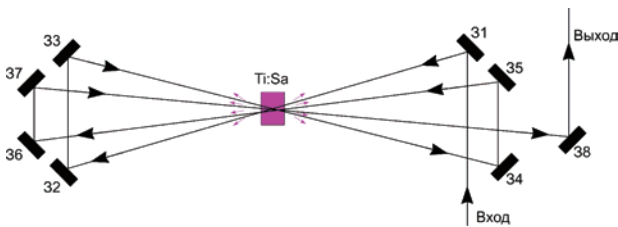


Рис. 4. Четырехпроходный усилитель. Схема оптическая принципиальная: 31, 32,...38 – зеркала; Ti:Sa – активный элемент из  $Ti:Al_2O_3$

Путем блокировки распространения основного лазерного импульса (ЛИ) на последовательных проходах через усилитель определены моменты генерации и пути распространения предимпульсов.

Предимпульсы появляются в результате рассеяния рабочего ЛИ при прохождении через АЭ (а также оптические окна криостата). Количество предимпульсов зависит от числа проходов через АЭ, а временное расстояние между предимпульсами и рабочим ЛИ зависит от расстояния между зеркалами усилителя.

В четырехпроходовой схеме усилителя генерируются следующие предимпульсы:

– предимпульс S1-1. Возникает в результате рассеяния на первом проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 38 – выход. Опере-

жает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 32 – 33 – 34 – 35 – 36 – 37 – Ti:Sa;

– предимпульс S1-2. Возникает в результате рассеяния на первом проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 36 – 37 – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 32 – 33 – 34 – 35 – Ti:Sa;

– предимпульс S2-1. Возникает в результате рассеяния на втором проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 34 – 35 – 36 – 37 – Ti:Sa;

– предимпульс S2-2. Возникает в результате рассеяния на втором проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 36 – 37 – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 34 – 35 – Ti:Sa;

– предимпульс S3-1. Возникает в результате рассеяния на третьем проходе рабочего ЛИ через АЭ. Распространяется по пути Ti:Sa – 38 – выход. Опережает рабочий ЛИ на время распространения излучения по пути Ti:Sa – 36 – 37 – Ti:Sa;

Поскольку, как правило, схема усилителя в достаточной мере симметрична, то есть расстояния, преодолеваемые излучением между последовательными проходами через АЭ, приблизительно одинаковы. Обозначим это расстояние  $L$ . Тогда эти пять предимпульсов при регистрации с помощью фотодиода и осциллографа сгруппированы в три группы, равноудаленные друг от друга и от основного импульса (см. рис. 5).

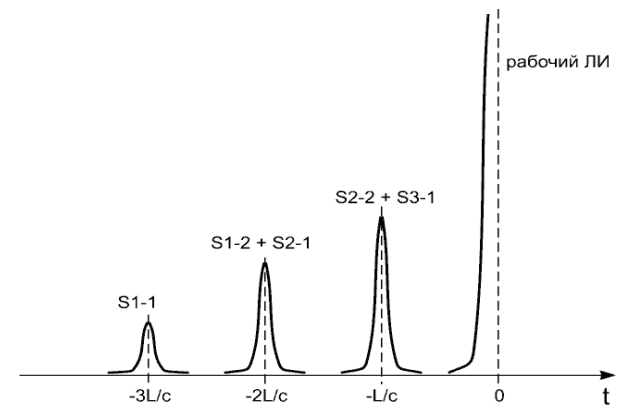


Рис. 5. Предимпульсы четырехпроходового усилителя.  $L$  – длина пути между последовательными проходами через АЭ,  $c$  – скорость распространения электромагнитного излучения

Так как в схеме УТ нет пространственных фильтров, то эти предимпульсы проходят по УТ, через КФИ до выхода установки.

Для выходного четырехпроходового МУ характерны предимпульсы, опережающие основной ЛИ на  $\sim 10,5$ ;  $\sim 21$ ;  $\sim 32$  нс, с отношением энергии основного УКИ и энергии предимпульсов  $E_0/E_p \sim 5 \cdot 10^6$ .

Для предпоследнего четырехпроходового усилителя характерны предимпульсы, опережающие

основной УКИ на  $\sim 4$ ;  $\sim 8$ ;  $\sim 12$  нс, с отношением энергии  $E_0/E_p \sim 2 \cdot 10^7$ .

Для пятипроходного ПУ характерны предимпульсы, опережающие основной УКИ на  $\sim 2,5$ ;  $\sim 5$ ;  $\sim 7,5$ ;  $\sim 10$  нс с отношением энергии  $E_0/E_p \sim 5 \cdot 10^6$ .

На осциллограмме, представленной на рис. 6, отображены предимпульсы предпоследнего четырехпроходного усилителя, локализованные на временном расстоянии 12 и 8 нс до основного импульса. Предимпульс на расстоянии 4 нс скрыт более мощным предимпульсом из предыдущего пятипроходного ПУ на расстоянии 5 нс.

В пятипроходном усилителе из ряда возможных зарегистрирован один предимпульс, расположенный на расстоянии 5 нс до рабочего ЛИ (расстояние двух проходов через АЭ). Еще один из возможных предимпульсов ПУ, расположенный на расстоянии  $\sim 2,5$  нс до основного УКИ, вероятно, скрыт нарастающим сигналом усиленной спонтанной эмиссии.

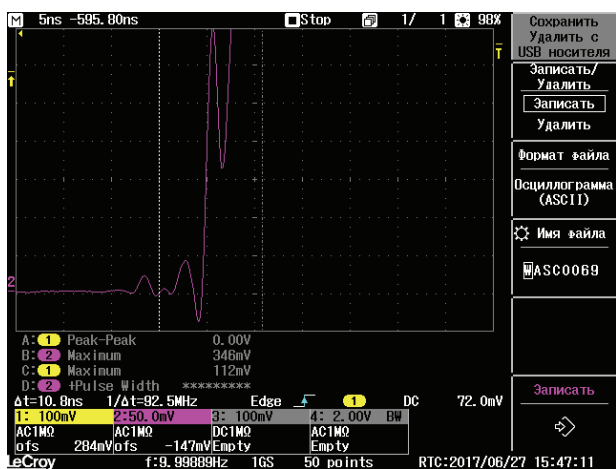


Рис. 6. Зашкальный эксперимент при измерении наносекундного контраста. Правый курсор соответствует положению основного ЛИ. Левый курсор установлен в положении  $-10,8$  нс. Предимпульсы  $-12$  и  $-8$  нс из четырехпроходного усилителя, предимпульс  $-5$  нс из пятипроходного

### Длительность предимпульсов многопроходных усилителей

Отдельно измерить длительность многопроходных усилителей на данный момент не удалось. Тем не менее, каждый предимпульс по сравнению с основным УКИ совершает по крайней мере на один проход через АЭ меньше. Для пятипроходного ПУ это 15 мм кристалла Ti:Sa, а для четырехпроходного МУ это 30 мм Ti:Sa и 40 мм стекла. Вследствие этого на входе в КФИ предимпульсы и основной ЛИ обладают различными параметрами чирпа, а, следовательно, отличающейся длительностью на выходе КФИ и на мишени. При минимальной длительности основного УКИ длительность самого короткого предимпульса из пятипроходного ПУ по крайней мере вдвое больше. Увеличение толщины АЭ, наличие дополнительных окон и увеличение количества не-

достающих проходов также увеличивает длительность предимпульса.

Кроме этого, каждый предимпульс, зарегистрированный фотоэлектрической диагностикой, представляет собой несколько импульсов, сгенерированных на разных поверхностях АЭ (и окнах криостата), на разных проходах через усилитель и прошедших слегка различными путями. То есть каждый предимпульс на осциллограмме на самом деле представлен группой из нескольких неразрешаемых предимпульсов. Этот фактор также снижает пиковую мощность предимпульсов.

### Фокусировка предимпульсов многопроходных усилителей

Поскольку источником предимпульсов, генерируемых в многопроходных усилителях, является рассеяние на кристалле (диффузно излучающий объект конечного размера на конечном расстоянии от фокусирующей оптики), то эти предимпульсы не обладают пространственными характеристиками рабочего ЛИ. Следовательно, предимпульсы концентрируются на мишени в пятна гораздо большего размера, чем основное фокальное пятно. Были зарегистрированы изображения дальней зоны рабочего УКИ и предимпульсов, генерируемых в выходном четырехпроходном МУ (рис. 7).

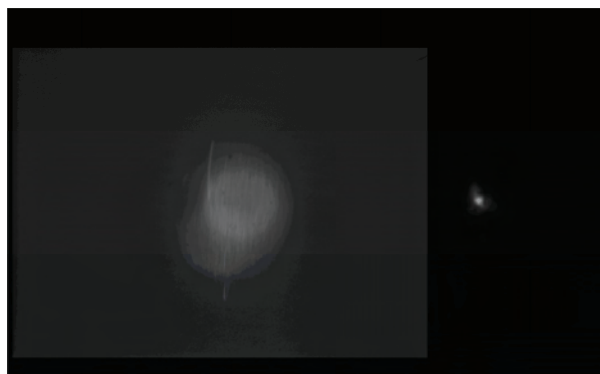


Рис. 7. Изображения в дальней зоне: слева – предимпульсы выходного усилителя (диаметр на полувысоте 404 мкм), справа – рабочий ЛИ (масштаб увеличен в  $10^x$  по сравнению с левым изображением, диаметр на полувысоте 3,3 мкм)

Размер пятна, в которое концентрируется излучение предимпульсов на два порядка больше фокального пятна рабочего ЛИ, площадь, соответственно на 4 порядка. Зная коэффициент ослабления фильтров при регистрации изображений, была сделана оценка плотности энергии предимпульсов в фокальной плоскости, которая составляет  $\sim 10^{-10}$  от плотности энергии в фокальном пятне рабочего ЛИ.

Таким образом, даже если предимпульсы из выходного усилителя на выходе КФИ имеют ультракороткую длительность, то их интенсивность не превышает  $\sim 10^{-10}$  от интенсивности рабочего ЛИ и они в экспериментах с интенсивностью основного УКИ

$\sim 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> не могут ионизировать мишень. Однако, по мере удаления источника предимпульсов от фокусирующего зеркала (рассеяние в АЭ на ранних стадиях усиления) пространственные характеристики предимпульсов могут значительно приблизиться к характеристикам рабочего ЛИ, и предимпульсы будут фокусироваться на мишень в пятно гораздо меньшего размера.

### Заключение

При выполнении работы зарегистрированы предимпульсы, генерируемые в многопроходных усилителях Ti:Sa фемтосекундной мультитераваттной лазерной системы.

На примере выходного четырехпроходного усилителя экспериментально установлено, что источником предимпульсов является рассеяние основного лазерного импульса при проходе через активный элемент и окна криостата.

Для всех трех линейных многопроходных усилителей, собранных по схеме «бабочка», определена временная локализация предимпульсов и измерены отношения энергии предимпульсов и основного УКИ.

Измерены параметры фокусировки предимпульсов входного мощного усилителя, определены отношения плотностей энергии предимпульсов и основного УКИ. Показано, что предимпульсы выходного усилителя не могут ионизировать мишень в экспериментах с доступной интенсивностью рабочего излучения  $\sim 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Параметры фокусировки предимпульсов, генерируемых на ранних стадиях усиления, измерены не были. При этом предполагается существенное приближение к пространственным характеристикам основного УКИ.

В связи с этим, наибольшее беспокойство вызывают предимпульсы, генерируемые в пятипроходном предварительном усилителе. Предполагая острую фокусировку предимпульсов, с учетом измеренной относительной энергии и минимального двукратного увеличения длительности предимпульсов в экспериментах интенсивность предимпульсов может приближаться к порогу плазмообразования  $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для подавления предимпульсов пятипроходного предварительного усилителя и следующего за ним четырехпроходного усилителя запланирована модернизация электрооптического изолятора обратноотраженного мишенью излучения на основе ячейки Поккельса [4], установленного на выходе четырехпроходного усилителя.

### Литература

1. Fourmaux S., Payeur S., Buffechoux S., Lassonde P., St-Pierre C., Martin F., and Kieffer J. C. Pedestal cleaning for high laser pulse contrast ratio with a 100 TW class laser system // OPTICS EXPRESS. 2011. Vol. 19. No. 9. P. 8486–8497.
2. Keppler S., Sävert A., Körner J., Hornung M., Liebetrau H., Hein J., Kaluza M. C. The generation of amplified spontaneous emission in high-power CPA laser systems // Laser Photonics Rev. 2016. Vol. 10. No. 2. P. 264–277.
3. Didenko N. V., Konyashchenko A. V., Lutsenko A. P., Tenyakov S. Yu. Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses // OPTICS EXPRESS. 2008. Vol. 16. No. 5. P. 3178–3190.
4. Zeil K, *et al.* The scaling of proton energies in ultrashort pulse laser plasma acceleration // New Journal of Physics. 2010. Vol. 12. P. 045015