

*and finely scale mixture of reagents. First of them is solved on the basis of model of environment capture, which happens on border of the turbulent jet and the external laminar environment. The second, connected with an estimation of effective speed of reaction, is considered within the limits of representations about the turbulent environment as sets of independent turbulent whirlwinds, at which casual contacts take place an exchange of reagents and reaction between them. The lead calculations have shown avalanche character of development of reactionary process, and also an essential role of a local thermal emission during mixing the reagents.*

PACS: 52.50.-b; 52.77.-j

УДК 53.082.77

## **Проект пикосекундного коммутатора на основе эффекта возникновения приграничного электронного слоя при облучении металлической мишени лазерными импульсами**

*М. В. Федоров*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*И. И. Неганов, М. А. Яковлев*

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Предложен новый физический механизм работы коммутатора на основе эффекта возникновения приграничного электронного слоя при облучении металлической мишени мощными лазерными импульсами. Рассмотрены физическая модель коммутатора и возможные варианты его исполнения.*

PACS: 52.38.-r

### **Введение**

Обзор современных пикосекундных коммутаторов представлен в работе [1]. Большинство из них основано на электрическом пробое газа. Основными параметрами таких коммутаторов являются время перехода из непроводящего состояния в проводящее и импульсная мощность.

Приведем типичные параметры коммутаторов из обзора [1]: время коммутации  $\sim 10^{-10} - 10^{-11}$  с; мощность  $\sim 10^8$  Вт.

В настоящей статье предлагается принципиально иной физический механизм работы коммутатора на основе эффекта возникновения приграничного электронного слоя при облучении металлической мишени мощными лазерными импульсами [2]; рассмотрены возможные схемы реализации данного устройства, его преимущества и недостатки, а также даны рекомендации по устранению последних.

### **Физические предпосылки**

Суть используемого эффекта заключается в следующем. При облучении металлической мише-

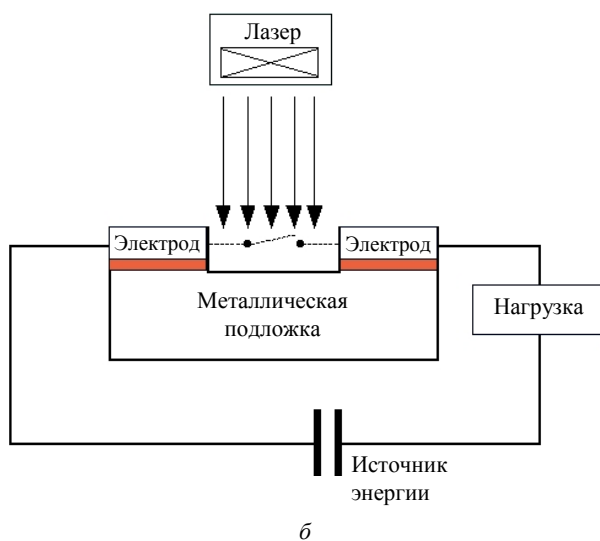
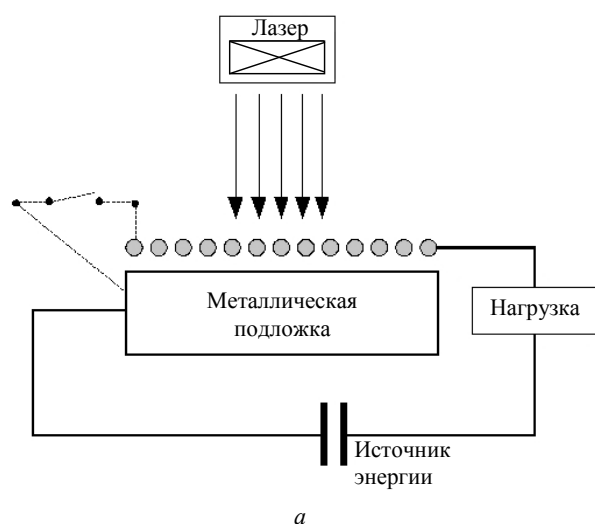
ни лазером определенной интенсивности (в данном случае  $\sim 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>) происходит резкое повышение электронной температуры. В результате электроны преодолевают потенциальный барьер на поверхности металла и выходят за его пределы на расстояние порядка нескольких сотен нанометров. Процесс происходит за время порядка  $10^{-15}$  с, при этом разрушения мишени не происходит вследствие того, что время выхода электронов из металла существенно меньше времени релаксации решетки. Более подробно данный эффект рассмотрен в работах [2, 3].

### **Идея устройства**

Возникающий на поверхности тонкий слой электронов предлагается использовать для замыкания и размыкания. Авторами статьи предложены две возможных схемы устройства (рисунок).

На схеме 1 лазерный луч, проходя сквозь сетку, облучает металлическую подложку. Образующийся при этом приграничный электронный слой (ПЭС) замыкает подложку на сетку, тем самым эффективно коммутируя их между собой. На схе-

ме 2 ПЭС, также индуцированный лазером, замыкает между собой два электрода, отделенных от проводящей подложки изолятором. Так как электронная плотность ПЭС на расстояниях порядка длины волны лазера есть величина порядка плотности электронов в металле или на один порядок меньше [2, 3], то коммутация будет эффективной именно на расстояниях такого порядка. Заметим, что вся конструкция должна находиться в вакууме, так как в случае газонаполненного коммутатора начнется процесс ионизации слоя газа, прилегающего к подложке. Тогда скорость процесса замыкания электродов будет определяться временем ионизации газа, а не временем выхода электронов; в таком случае отсутствует преимущество над коммутаторами из обзора [1] по времени срабатывания. К тому же, коммутация ионизированным газом не является чем-то новым на сегодняшний день, такие коммутаторы уже очень широко распространены.



Варианты технического исполнения коммутатора:  
а — схема 1; б — схема 2

### Преимущества коммутатора, основанного на схеме 2

Самое важное преимущество такого способа коммутации над остальными заключается в том, что время образования приграничного электронного слоя есть величина порядка  $10^{-15}$  с, т. е. с помощью данной схемы (без учета некоторых электрических эффектов, о которых пойдет речь далее) теоретически можно получить время коммутации существенно меньшее, чем у современных коммутаторов, основанных на электрическом пробое. В ряде случаев преимуществом могут стать малые геометрические размеры устройства.

### Проблемы

Для данного устройства, помимо сложности технического исполнения, характерны две серьезные проблемы, связанные с малым расстоянием между электродами ( $\approx 500$  нм):

- емкость конденсатора, образованного электродами;
- электрическая прочность коммутатора (максимальная разность потенциалов на электродах).

Обе проблемы являются следствием малого расстояния между электродами. Так, в случае эффективной площади контактов, равной  $1 \text{ мм}^2$ , и расстояния  $500 \text{ нм}$  между ними получаем межэлектродную емкость порядка десятков пикофарад:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-9}} \text{ Ф} = 17,7 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \approx 20 \text{ пФ}.$$

Максимальное постоянно приложенное напряжение при этом будет величиной порядка единиц вольт даже в вакууме.

### Предложения по устранению недостатков

Существует несколько методов для преодоления вышеуказанных проблем, в частности, для уменьшения емкости необходимы:

- повышение расстояния между электродами;
- понижение площади электродов и/или изменение их геометрии;
- установка нескольких коммутаторов последовательно;
- комплексирование предыдущих методов.

Последовательно рассмотрим эти методы.

- *Повышение расстояния между электродами.* Данный метод напрямую неприменим, так как ПЭС возникает на ограниченном расстоянии от мишени. Однако можно повысить расстояние выхода электронов с помощью приложения постоянного электрического поля, повысив таким образом расстояние между электродами. Учитывая однако

максимальное постоянное напряжение на электродах в единицы и десятки вольт, в действительности этот метод будет очень сложно применять. Необходимо также оценить напряжение, необходимое для увеличения толщины электронного слоя на сколь-нибудь заметное расстояние.

- *Понижение площади электродов и/или изменение их геометрии.* Вполне допустимо уменьшить площадь электродов, пожертвовав при этом сечением проводника и понизив проводимость. Экстремальное понижение площади электродов сведет все устройство к субмикронным размерам. Можно использовать другую форму электродов, например реализовав один электрод в виде иглы. Емкость при этом падет, однако максимально допустимое напряжение упадет вместе с ней вследствие повышения напряженности поля у острия.

- *Установка нескольких коммутаторов последовательно.* Это наиболее вероятный способ понижения емкости, а также напряжения пробоя. Так, для понижения емкости на порядок необходимо использовать десять последовательно соединенных коммутаторов. При этом естественным образом повысится и общее сопротивление.

- *Комплексирование предыдущих методов.* Вероятно, понизить емкость на два порядка можно лишь с помощью комплексирования предыдущих методов, например понизив площадь электродов до 0,1 мм и последовательно соединив несколько звеньев. Обратим внимание на проблему повышения максимального напряжения. Исходя из расстояния между проводниками, вполне очевидно, что устройство будет низковольтным. Так же, как и в предыдущем методе, определим, что мы желаем получить. Сразу поставим ограничение снизу: десятки вольт. В качестве разумной цели можно установить напряжение коммутации порядка сотен вольт. Достичь это значение можно следующими способами:

- увеличение расстояния между электродами;
- создание максимально плоских электродов без шероховатостей и острых углов;
- работа коммутатора в импульсном режиме;
- использование особого диэлектрика в качестве среды;
- последовательное соединение коммутаторов;
- комплексирование предыдущих методов.

Комментарии к этим методом большей частью совпадают с комментариями к предыдущим. Ис-

ключение составляет метод *работы коммутатора в импульсном режиме*. Здесь имеется в виду следующее: на коммутатор подается не постоянное напряжение, а короткий импульс порядка десятков пикосекунд (возможно, даже более длительный). Суть его в том, что для развития электрического пробоя требуется определенное время, тогда, если время, необходимое для развития пробоя хотя бы на один — два порядка больше времени коммутации, то можно обойтись коротким импульсом повышенного напряжения.

Время развития пробоя можно оценить по работе коммутаторов, основанных на данном эффекте, подробное описание которых можно найти в работе [1]. Оно составляет единицы и десятки пикосекунд для развития пробоя в газе. Можно также предположить, что в вакууме пробой будет развиваться за еще более длительный промежуток времени.

Отметим и то, что на напряжение пробоя существенно влияет обработка электродов. Если использовать шероховатые, плохо обработанные электроды, то электрическая прочность среды составит величину порядка  $10^4$  В/см, т. е. пробой в вакууме будет происходить практически при том же напряжении, что и в воздушной среде. Напротив, при “хороших” (гладких) электродах среда будет соответствовать электрически прочному диэлектрику (по данным Физической энциклопедии).

## Выводы

Предложенная схема устройства может обеспечить лучшее время коммутации по сравнению с современными аналогами. Вопрос об устранении ряда проблем по практической реализации данного устройства будет решаться в дальнейших работах.

## Литература

1. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей// УФН. 2005. Т. 175. № 3.
2. Яковлев М. А., Федоров М. В. Влияние приповерхностного электронного слоя на энергетический спектр фотоэлектронов// ЖЭТФ. 2002. Т. 122. № 10. С. 814—819.
3. Ивлев А. В., Яковлев М. А. Борденюк А. Н. Моделирование пробоя газа электронами пограничного слоя при облучении металлических мишеней пикосекундными лазерными импульсами// ЖТФ. 1998. Т. 68. № 8.

Статья поступила в редакцию 22 июля 2008 г.

## **Picosecond commutation device project relying upon the effect of border electron layer ejection from metal target when illuminated by power laser pulses**

*M. V. Fedorov*

General Physics Institute of Russia, Moscow, Russia

*I. I. Neganov, M. A. Yakovlev*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*We use fundamentally different physical action in our work which is based on the effect of border electron layer ejection from metal target when illuminated by power laser pulses. In the work herein we consider physical model of such commutator and possible technical embodiments. Theoretically one can achieve transition time about  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  seconds in this model, while power handling is of the same order of magnitude as in or by an order less.*

PACS: 52.38.-r

\* \* \*