

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ФОТОЭМИССИОННОЙ КОММУТАЦИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Хоцеловский Никита Сергеевич (otd4@expd.vniief.ru),  
Конкин Антон Сергеевич, Иванов Константин Александрович, Пухов Сергей Павлович*

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

В работе представлены результаты экспериментального исследования возможности создания высоковольтных лазерных коммутаторов с рабочей частотой до 1 кГц. Особенности работы фотоэмиссионной системы коммутации в режиме ограничения тока объемным зарядом были исследованы в серии модельных экспериментов, в которых в качестве моделирующего устройства использовался сурьмяно-цезиевый фотоэлемент Ф-22.

**Ключевые слова:** коммутация, высоковольтная коммутация, фотоэмиссия, фотоэмиссионный эффект, фотокатод.

## INVESTIGATION OF A PROCESS OF HIGH-VOLTAGE LASER PHOTOEMISSIVE SWITCHING

*Khotselovski Nikita Sergeevich (otd4@expd.vniief.ru),  
Konkin Anton Sergeevich, Ivanov Konstantin Aleksandrovich, Pukhov Sergej Pavlovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The results of experimental research of the possibility of creating high-voltage laser switches with operation frequency up to 1 kHz are presented in the paper. The peculiarities of photoemissive switching system operation in the mode of current limitation by space charge were studied during a set of model experiments where antimonial-caesium photoemissive cell F-22 was used.

**Key words:** switching, high-voltage switching, photoemission, photoemissive effect, photocathode.

### Введение

В настоящее время происходит интенсивное развитие импульсной высоковольтной техники. Следствием этого является высокая потребность в разработке новых принципов коммутации высокого напряжения (>100 кВ) для создания приборов, способных пропускать импульсные токи в десятки кА, стабильно работать на высоких частотах (>1 кГц) и обладающих возможностью синхронизации с внешними устройствами с наносекундной точностью.

В данной работе рассмотрен перспективный метод коммутации путем замыкания вакуумного межэлектродного пространства фототоком, инициированным наносекундным лазерным импульсом. У предложенного метода можно выделить ряд суще-

ственных преимуществ перед другими методами коммутации:

- высокая точность синхронизации, связанная с жесткой привязкой импульса тока к импульсу управляющего лазера;
- возможность изменения величины тока коммутации (путем изменения энергии импульса лазера);
- низкая эрозия электродов вследствие их равномерного нагружения.

Для лазерной фотоэмиссионной коммутации также существуют определенные недостатки, которые могут оказать значительное негативное воздействие на эффект коммутации. Так, для снижения требуемого уровня энергии лазерного импульса на фотокатод наносится покрытие с высоким квантовым выходом электронов, аналогичное тем, что используются в вакуумных фотоэлементах. Данное

покрытие очень требовательно к составу и уровню остаточного давления среды в рабочем вакуумном объеме. Последнее приводит к необходимости постоянной откачки фотоэмиссионного коммутатора и ограничивает величину предельной пропускаемой мощности

В настоящей работе представлена численная модель лазерного фотоэмиссионного коммутатора с напряжениями коммутации до нескольких сотен кВ, токами в 1–10 кА и частотами работы до 1кГц и проведено моделирование его работы. Проведены модельные эксперименты с макетом фотоэмиссионного коммутатора, результаты которых хорошо согласуются с численным моделированием.

### Моделирование процесса лазерной фотоэмиссионной коммутации

Для приближенного математического описания лазерной фотоэмиссионной коммутации была выбрана модель, основанная на законе Чайлда-Ленгмюра и законах электронной фотоэмиссии [1]. Данная модель дает значение тока через коммутатор в зависимости от напряжения на электродах, мощности лазерного излучения и геометрических параметров электродов:

$$I = \begin{cases} (V > 0) : \min(YP, AV^{3/2}) \\ (V < 0) : 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток через лазерный коммутатор;  $V$  – напряжение между анодом и катодом;  $Y$  – фоточувствительность катода;  $P_{\text{изл}}$  – мощность лазерного излучения;  $A = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot S/d^2$  – геометрический коэффициент, где  $S$  – площадь электродов,  $d$  – расстояние между электродами [1].

Схема лазерного фотоэмиссионного коммутатора представлена на рис. 1. Численное моделирование производилось в среде QUCS.

Параметрами моделирования являлись начальное напряжение на конденсаторе 1 и энергия лазерного импульса, подаваемого на коммутатор. В качестве результатов фиксировались диаграммы тока и напряжения через коммутатор в ходе переходного процесса.

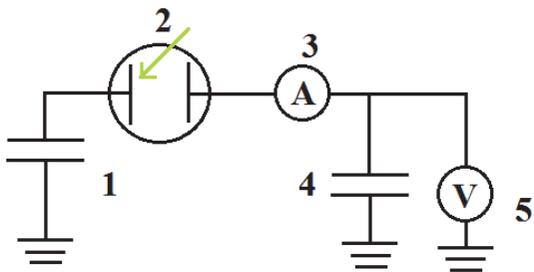


Рис. 1. Электрическая схема для численного моделирования: 1 – конденсатор (емкость 2200пФ); 2 – коммутатор(фотокатодФ-22); 3 – датчик тока; 4 – конденсатор (емкость 100/470 пФ); 5 – датчик напряжения

### Результаты расчетов и экспериментов

Для экспериментального исследования процесса лазерной фотоэмиссионной коммутации был собран экспериментальный стенд (см. рис. 2).

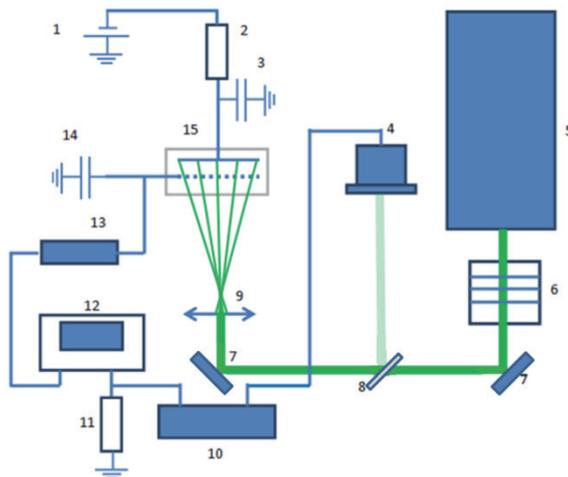


Рис. 2. Схема экспериментального стенда по исследованию процесса лазерной фотоэмиссионной коммутации: 1 – высоковольтный блок питания СБПК-20; 2 – балластное сопротивление 100 кОм; 3 – высоковольтный конденсатор 2200 пФ; 4 – контрольный фотоэлемент Ф-32; 5 – лазер ЛН532; 6 – набор нейтральных светофильтров; 7 – алюминиевые зеркала; 8 – светоделительная пластина; 9 – фокусирующее зеркало; 10 – измерительный коммутационный блок; 11 – измерительная нагрузка 50 Ом; 12 – осциллограф Tektronix TDS 3052; 13 – высоковольтный делитель напряжения; 14 – высоковольтный конденсатор 100/470 пФ; 15 – фотоэлемент Ф-22

Излучение лазера 5, рис. 2, через набор нейтральных светофильтров 6 заводится на фокусирующую линзу 9 с помощью алюминиевых зеркал 7. За фокусирующей линзой устанавливается фотоэлемент Ф-22 15. Расстояние между фотоэлементом и линзой подбирается так, что пучок лазерного излучения засвечивает весь фотокатод. Часть лазерного излучения отводится с помощью делительной пластины 8 на контрольный фотоэлемент Ф-32 4. К катоду исследуемого фотоэлемента подключается высоковольтный конденсатор емкостью 4700 пФ 3, который заряжается через балластное сопротивление номиналом 100 кОм 2 от высоковольтного блока питания СБПК 1 напряжением от -1000 В до -9000 В. Электрический сигнал, формирующийся на емкостной нагрузке 14 через высоковольтный делитель напряжения 13 передается на осциллограф TDS3052 12. Регистрация сигнала с контрольного фотоэлемента Ф-32 выполняется по стандартной схеме с разделительным конденсатором, которая реализована в измерительном коммутационном блоке 10. Данный сигнал также фиксируется осциллографом на нагрузке 50 Ом.

Основные результаты проведенных расчетов и экспериментов представлены на рис. 3–4.

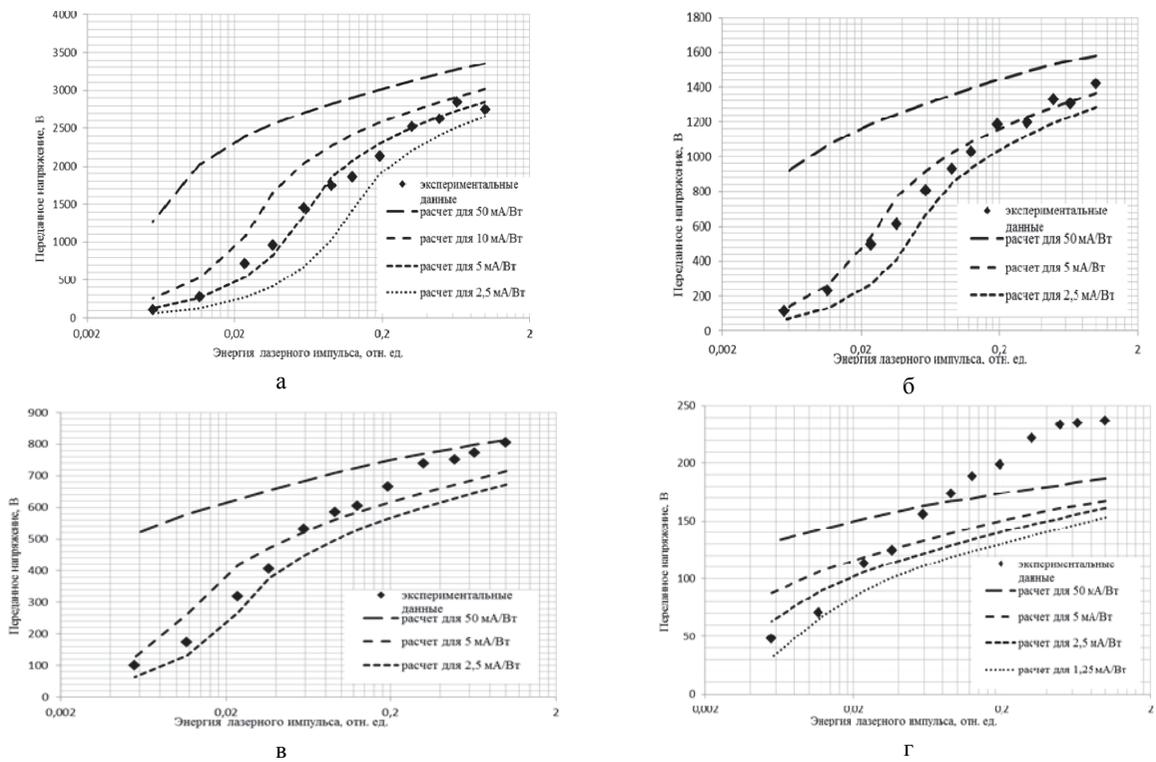


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости значения напряжения на нагрузке от лазерной энергии при коммутации на емкость в 470 пФ. Напряжение на накопительном конденсаторе: а – 9000 В, б – 5000 В, в – 3000 В, г – 1000 В

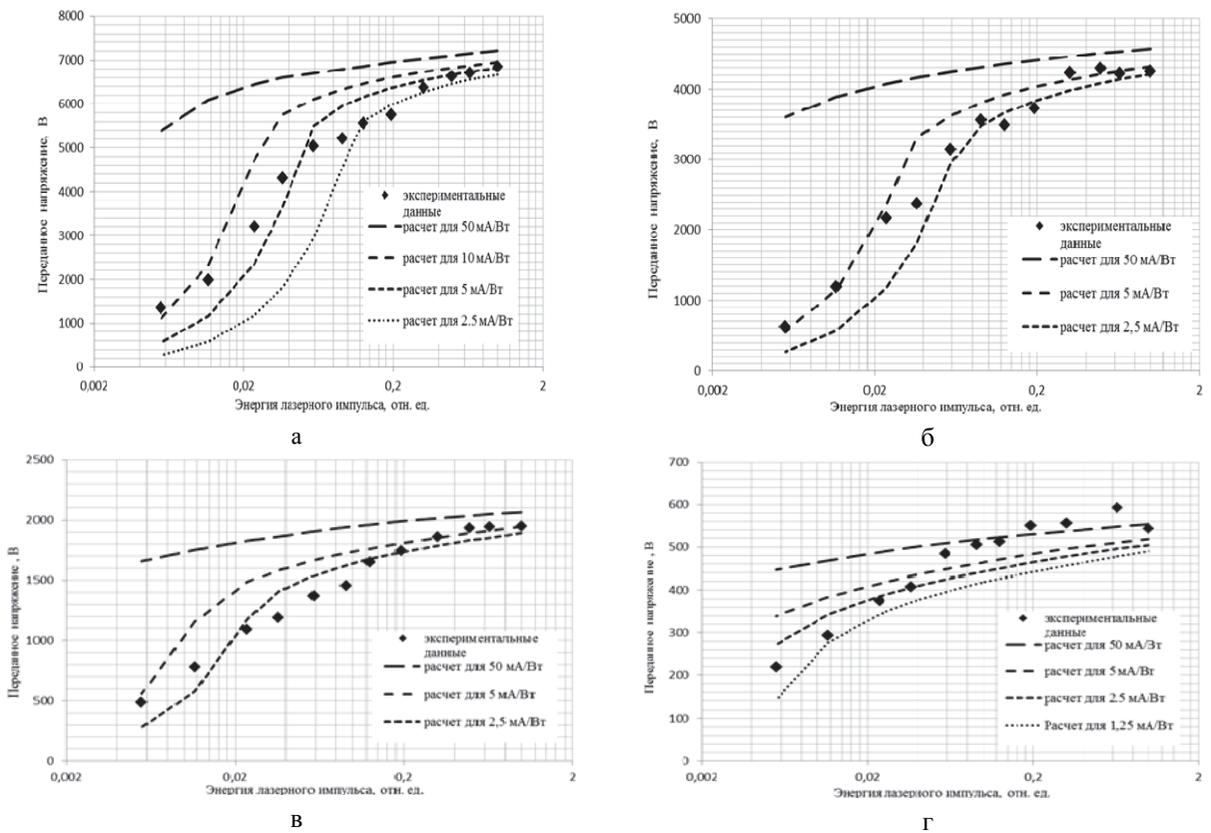


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости значения напряжения на нагрузке от лазерной энергии при коммутации на емкость в 100 пФ. Напряжение на накопительном конденсаторе: а – 9000 В, б – 6000 В, в – 3000 В, г – 1000 В

Полученные зависимости показывают хорошее согласие экспериментальных данных с результатами численного моделирования при высоких значениях напряжения на накопительном конденсаторе и уровнях лазерной энергии.

Для низких уровней лазерной энергии наилучшее описание экспериментальных результатов достигается в расчетной модели с пониженной фоточувствительностью. При этом, чем выше напряжение на накопительном конденсаторе, тем выше уровень фоточувствительности, при котором численная модель согласуется с экспериментальными данными. Так, для напряжения на накопительном конденсаторе 9 кВ экспериментальные данные хорошо описываются численной моделью с фоточувствительностью от 5 до 10 мА/Вт, а для напряжения питания 3 кВ это значение лежит в диапазоне 2,5–5 мА/Вт.

### Экспериментальные исследования частотного режима 15 Гц

Для проведения исследований стабильности и ресурса работы лазерного коммутатора в частотном режиме была использована экспериментальная схема, представленная на рис. 5.

Данная схема состоит из двух основных частей: электрической и оптической. Электрическая часть схемы состоит из: блока питания 1, рис. 5, автотрансформатора, высоковольтного трансформатора 3, умножителя напряжения 4, балластного зарядного сопротивления 360кОм 6, накопительных конденсаторов 0,1 мкФ 5, 15 нФ 7, емкостной нагрузки 470 пФ 15, макета коммутатора 16, высоковольтного делителя напряжения 640:1 11.

Оптическая часть схемы состоит из: лазера LOTIS ТП LS-2134UTF 8, делительной пластинки 9, системы световых фильтров 12, ФЭК 13 и рассеивающей линзы 14.

Изначально задаваемое источником питания 1 напряжение регулировалось при помощи автотрансформатора 2. Затем переменное напряжение преобразовалось высоковольтным трансформатором 3, выпрямлялось умножителем напряжения 4 и сглаживалось на накопительном конденсаторе 5, на котором формировалось напряжение до 25 кВ. Данным напряжением через балластное сопротивление 6 заряжается конденсатор 7, который используется для накопления заряда с дальнейшей его коммутацией через коммутатор 16. Формируемый на нагрузках 10 и 15 сигнал регистрируется на осциллографе 17, через высоковольтный делитель 11.

Работая в импульсно-периодическом режиме, лазер 8 выдавал импульсы излучения на длине волны 532 нм, с энергией до 100 мДж, длительностью 20 нс и частотой следования 15 Гц; лазер 10 в данном эксперименте не задействован. Импульсы лазерного излучения, проходя через делительную пластину 9, разделялись на две части: первая растягивалась рассеивающей линзой 14 на поверхность фотокатода макета коммутатора, вторая, проходя через систему фильтров 12, попадала на калиброванный ФЭК 13, сигнал с которого регистрировался осциллографом 17.

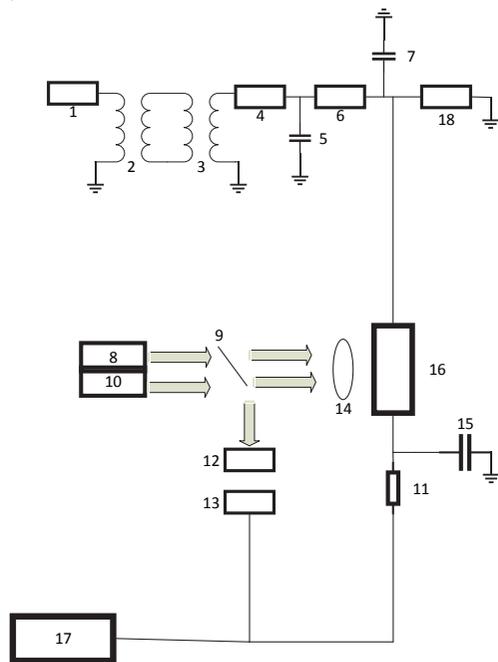


Рис. 5. Экспериментальная схема для исследования коммутации в частотном режиме: 1 – блок питания, 2 – автотрансформатор (0-250 В), 3 – высоковольтный трансформатор, 4 – умножитель напряжения, 5 – конденсатор емкостью 0,1 мкФ, 6 – умножитель напряжения, 7 – конденсатор емкостью 15 нФ, 8 – лазер LOTIS ТП LS-2134UTF, 9 – делительная пластинка, 10 – лазер НЛДН532, 11 – делитель напряжения, 12 – система световых фильтров, 13 – ФЭК, 14 – рассеивающая линза, 15 – конденсатор емкостью 470 пФ, 16 – коммутатор, 17 – осциллограф Tektronix TDS3054B, 18 – вольтметр

В качестве коммутатора в экспериментах использовался фотоэлемент Ф-22.

На рис. 6 приведен характерный вид сигнала с делителя напряжения в наносекундной (рис. 6, а) и миллисекундной (развертках рис. 6, б).

Из рис. 6, б видно, что частота коммутации равна 15 Гц.

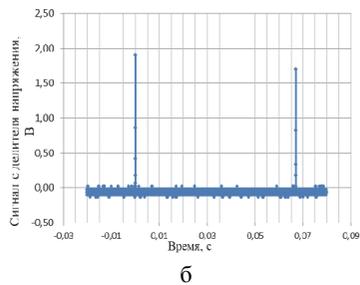
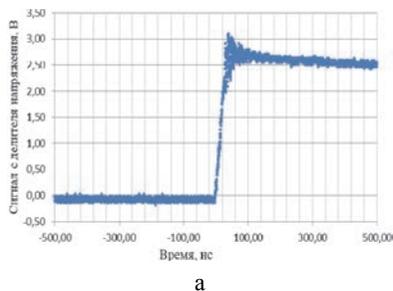


Рис. 6. Характерный вид сигнала с делителя напряжения в развертках: а – наносекундной, б – миллисекундной

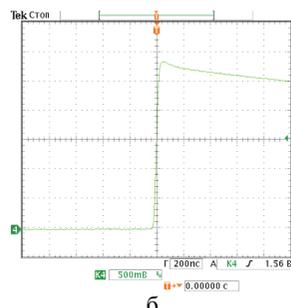
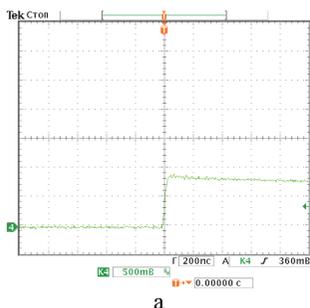


Рис. 7. Осциллограммы с делителя напряжения: а – после прихода импульса от лазера НЛДН532, б – после прихода импульса от лазера LOTIS ТП LS-2134UTP

### Экспериментальные исследования частотного режима 1 кГц

Ниже представлены результаты исследований работы лазерного коммутатора в условиях имитации частотного режима 1 кГц. Была использована та же схема, что и на рис. 5, при этом использовался лазер 10, выдававший импульс с задержкой 1 мс относительно лазера 8. Синхронизация импульсов осуществлялась при помощи внешнего генератора.

На рис. 7 приведены импульсы с высоковольтного делителя и контрольного ФЭКа. Энергия обоих лазеров составляла около 2 мДж. Результаты проведенных экспериментов показали, что при одинаковой энергии импульсов лазерного излучения сигнал с делителя напряжения имеет большую амплитуду при большей длительности лазерного излучения; данный факт связан с тем, что в случае более длительного лазерного импульса меньше сказывается ограниченные величины коммутируемого тока объемным зарядом вследствие более низкой плотности фототока.

На рис. 8 приведена осциллограмма сигнала с делителя напряжения на миллисекундной развертке при срабатывании двух лазеров с задержкой в 1 мс, что соответствует условной частоте в 1 кГц.

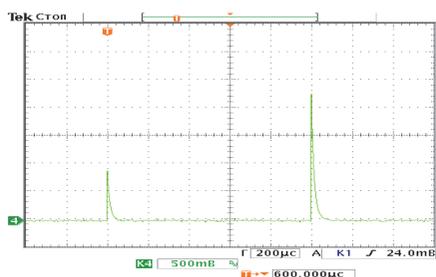


Рис. 8. Осциллограмма с делителя напряжения при срабатывании двух лазеров

### Заключение

Разработана численная модель лазерного фотоэмиссионного коммутатора. Выполнено численное моделирование работы лазерного фотоэмиссионного коммутатора в ряде практических схем.

Разработаны схемы для экспериментального исследования процесса лазерной фотоэмиссионной коммутации в серии модельных экспериментов с использованием в качестве коммутатора фотоэлемента Ф22. В результате проведенных экспериментов получены значения напряжения на емкостной и резистивной нагрузках в зависимости от лазерной энергии и коммутируемого напряжения. Зависимости напряжения на нагрузке имеют линейный характер при низких уровнях лазерной энергии и уходят в насыщение с ее ростом.

При коммутации напряжения 9 кВ предельные уровни напряжения на емкости 100 пФ составляют 6,8 кВ, а на емкости 470 пФ – 2,8 кВ. Разработана экспериментальная схема для исследования процесса лазерной фотоэмиссионной коммутации с повышенным уровнем коммутируемого напряжения (до 25 кВ), функционирующая в частотном режиме с частотой 15 Гц и в двух импульсном режиме с задержкой 1 мс; проведена серия экспериментов с использованием в качестве коммутатора фотоэлемента Ф22.

Полученные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования подтвердили возможность создания высоковольтных лазерных коммутаторов с рабочей частотой до 1 кГц.

### Список литературы

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2004.