

УДК 621.384.6;621.373

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ СИСТЕМЫ МОДУЛЯЦИИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2019 г. О. А. Шевченко<sup>1,\*</sup>, Т. В. Саликова<sup>1</sup>, С. В. Тарарышкин<sup>1</sup>,  
Я. В. Гетманов<sup>1,3</sup>, С. Л. Вебер<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Рассмотрен простой способ модуляции мощности выходного излучения лазера на свободных электронах, работающего в генераторном режиме (ЛСЭ – осциллятора), который позволяет плавно регулировать среднюю мощность излучения, а также получать короткие макроимпульсы с минимальной длительностью до 35 микросекунд. Предлагаемый способ основан на периодическом сдвиге фазы электронного сгустка, приходящего в ондулятор ЛСЭ, относительно импульса излучения, накопленного в оптическом резонаторе, что приводит к подавлению генерации. Частота фазового сдвига, необходимая для подавления генерации, относительно невелика, поэтому частота повторения электронных сгустков при этом меняется незначительно. Чтобы продемонстрировать осуществимость предложенного метода, мы создали компьютерный стенд, который описан в данной статье. Стенд содержит стандартные блоки САМАС: таймер-модулятор (G0609) и генератор тактовых импульсов (G0601). Сдвиг фазы электронных сгустков осуществляется с помощью программируемого пропуска периодов опорного сигнала, который используется для запуска модулятора тока пучка в электронной пушке. Пропуск периодов контролируется компьютерной программой, работающей в режиме реального времени. Генератор тактовых импульсов формирует сигналы синхронизации для запуска экспериментального оборудования пользователей. Тестирование стенда проводилось на станции ЭПР-спектроскопии с временным разрешением, позволяющим выполнить оценку длительности генерируемых макроимпульсов.

DOI: 10.1134/S0367676519020261

### ВВЕДЕНИЕ

При использовании лазеров в проведении физических экспериментов часто возникает задача модуляции мощности излучения лазера. Для решения такой задачи традиционно используются простейшие механические затворы. Однако их применение ограничено малыми частотами прерывания излучения лазера. Для реализации более высоких частот и в зависимости от мощности модулируемого излучения, а также от требований к глубине модуляции применяются затворы на основе различных физических эффектов в среде ячейки модулятора: Керра, Поккельса и т.д. Широкое распространение получили также способы модуляции излучения, основанные на изменении внутренних параметров лазера, различающиеся сложностью реализации и соответствием требований к частотам и глубине модуляции.

Нами предложен простой метод модуляции мощности выходного излучения лазера на свободных электронах, позволяющий плавно регу-

лировать среднюю мощность излучения за счет изменения скважности, а также получать короткие (до 35 микросекунд) импульсы излучения, что может быть необходимо, например, для предотвращения нагрева исследуемого под облучением образца при сохранении пиковой мощности ЛСЭ. Метод основан на периодическом сдвиге фазы пучка электронов относительно пучка лазерного излучения, возбуждаемого в оптическом резонаторе, что приводит к подавлению генерации. Фазовый сдвиг, необходимый для подавления генерации, относительно мал и существенно не меняет частоту повторения импульсов пучка электронов. Требование на малое изменение частоты повторения электронного пучка важно, так как связано с изменением нагрузки на ускоряющую электронный пучок ВЧ-систему и, как следствие, с изменением потерь электронов в ускорятельном тракте.

Схема и принцип работы лазера на свободных электронах приведены в работе [1].

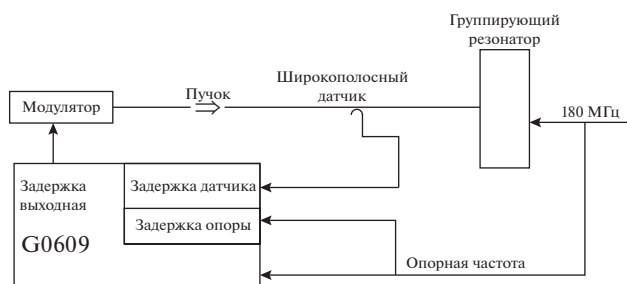


Рис. 1. Схема запуска модулятора электронных сгустков.



Рис. 2. Модифицированная схема запуска модулятора электронных сгустков.

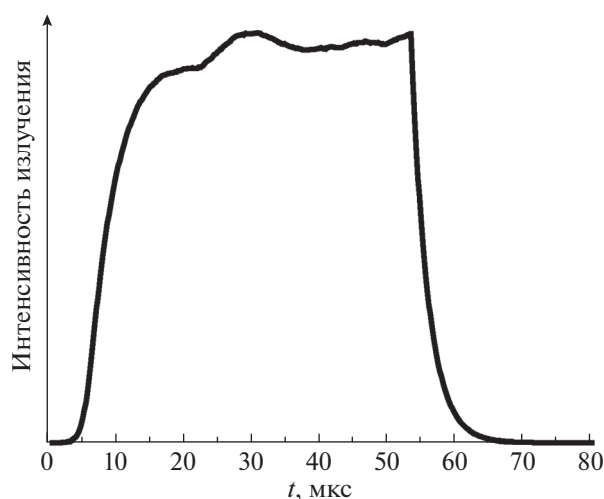


Рис. 3. Расчетная динамика нарастания и затухания средней мощности излучения ЛСЭ.

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СХЕМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

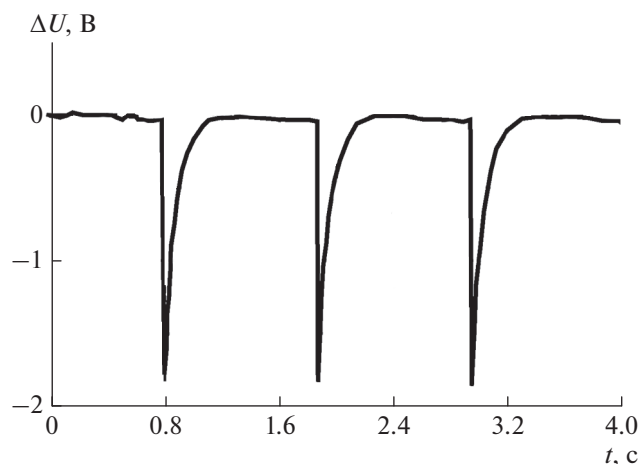
Частота и фаза электронного пучка определяются таймером модулятора (ТМ) G0609. Импульсы вырабатываются из опорной частоты  $f_0 = 180.4$  МГц, строго привязанной к частоте резонаторов ВЧ-системы. Частота следования импульсов соответствует  $f_{mod} = \frac{f_0 N}{2M}$ , где  $M$  и  $N$  – натуральные числа; т.е. на базовом интервале времени

$T_{base} = T_0 \frac{M}{2}$ , где  $T_0$  – период опорной частоты, блок формирует последовательность из  $N$  открывающих модулятор импульсов, жестко привязанных к фазе опорной частоты и расставленных максимально равномерно по базовому интервалу. Схема включения показана на рис. 1.

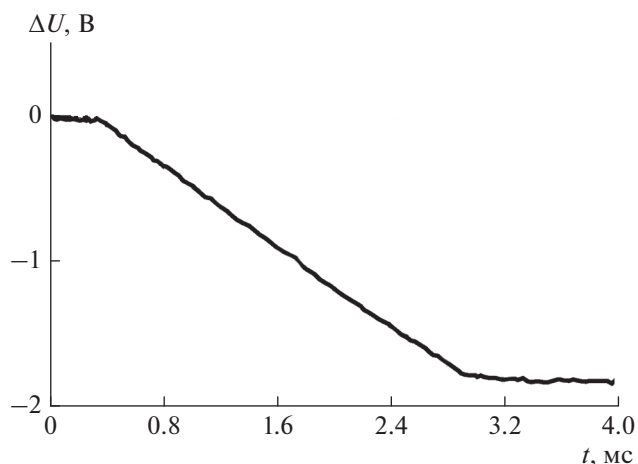
Для демонстрации возможности реализации предложенного метода без модификации алгоритмов общего программного обеспечения управления ЛСЭ был создан компьютерный стенд, позволяющий проверить метод модуляции излучения. Для этого в тракт опорной частоты был включен G0609 (2), аналогичный имеющемуся, как показано на рис. 2. Также в состав стенда был включен генератор тактовых импульсов (ГТИ) G0601, вырабатывающий тактирующие импульсы модуляции излучения, позволяющий также привязать эти импульсы к питающей сети 50 Гц или другому внешнему сигналу.

Сдвиг фазы пучков электронов осуществляется программируемым пропуском периодов опорной частоты, который производится с помощью G0609 (2). В режиме генерации во втором таймере заданы следующие значения  $N = 100$  и  $M = 100$ . При этом частота опорного сигнала на выходе второго таймера составляет половину частоты исходного сигнала  $f'_0 = \frac{f_0}{2} = 90.2$  МГц. Генерация возникает при значениях  $N = 480$  и  $M = 3840$  в первом таймере, которым соответствует частота следования электронных сгустков  $f_{beam} = 5.64$  МГц. При изменении значения  $N$  во втором таймере на единицу ( $N = 99$ ) временная структура опорного сигнала для первого таймера меняется таким образом, что через каждые 99 периодов импульсы сдвигаются во времени на один дополнительный период, который многократно превышает длительность электронного и светового пучков, в результате чего нарушается одновременность их прихода в ондулятор. На 99 импульсов опорного сигнала приходится не более 12 электронных сгустков, что при частоте повторения 5.64 МГц соответствует временному интервалу  $\sim 1.8$  мкс. Этого недостаточно для существенного нарастания мощности излучения (см. рис. 3), поэтому генерация практически полностью подавляется. Средний ток пучка при этом меняется всего лишь на 1%, что практически не сказывается на работе ВЧ-системы.

Следует отметить, что при выключении генерации средняя мощность излучения ЛСЭ уменьшается постепенно за время, которое определяется добротностью резонатора. В нашем случае это время составляет  $\sim 5$  мкс. Для установления стационарного режима при включении генерации требуется время того же порядка (10–15 мкс), как это показано на рис. 3. Результаты расчетов динамики нарастания и убывания средней мощности,



**Рис. 4.** Временная зависимость интенсивности ЭПР-сигнала, обусловленная периодическим импульсным воздействием терагерцевого излучения ЛСЭ. Период повторения терагерцевых макроимпульсов составил  $\sim 1.1$  с.



**Рис. 5.** Динамика изменения ЭПР-сигнала под действием терагерцевого излучения ЛСЭ, отражающая процесс нагрева образца. Длительность макроимпульса терагерцевого излучения составила  $\sim 2.5$  мс.

представленные на данном рисунке, выполнены с использованием программы расчета ЛСЭ, описанной в [2]. Они хорошо согласуются с результатами измерений [3]. Таким образом, предлагаемый метод в нашем случае не позволяет получать макроимпульсы излучения короче 15–20 мкс, но для многих экспериментов, в которых требуется модуляция мощности излучения, этого оказывается достаточно.

Изменение параметра  $N$  второго таймера осуществляется программой, написанной на языке С и работающей на компьютере под управлением операционной системы реального времени LynxOS v3.1. Эта среда позволяет переключать режимы с точностью до 16 микросекунд. Программа может формировать как одиночные макроимпульсы, так и периодические их последовательности с периодом несколько секунд, при этом скважность можно легко настраивать. ГТИ предназначен для передачи сигналов синхронизации на оборудование пользователя.

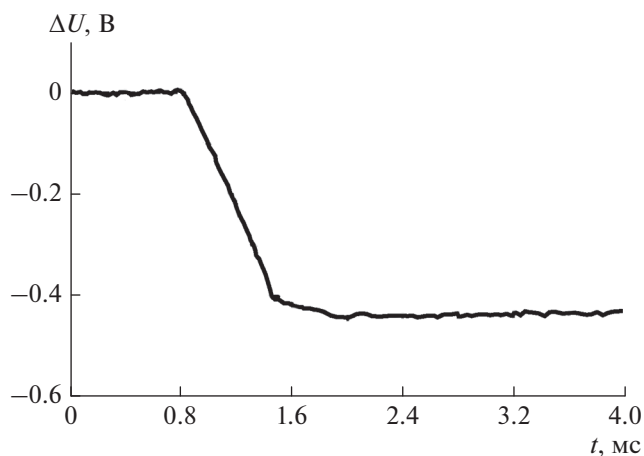
## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Тестирование импульсного режима работы лазера проводилось на станции ЭПР-спектроскопии с временным разрешением [4]. В качестве образца использовался микрокристалл магнитоактивного комплекса  $\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{Pr}}$  [5]. Для данного комплекса ранее было показано, что воздействие мощного длинноволнового излучения первой очереди ЛСЭ не влияет на его спиновое состояние и структуру, но приводит к нагреву образца посредством поглощения терагерцевого излуче-

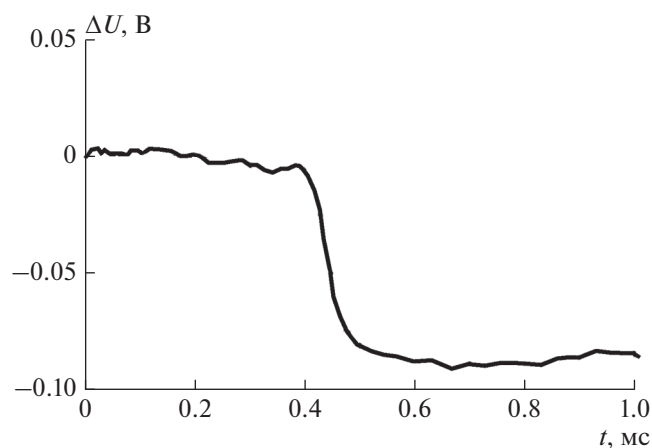
ния [6]. Интенсивность регистрируемого в ЭПР-эксперименте сигнала зависит от температуры образца, что позволяет использовать ЭПР-спектрометр в проводимых экспериментах в качестве быстрого детектора терагерцевого излучения с временем отклика менее 1 мкс. Эксперименты проводились при относительно высокой температуре образца ( $\sim 90$  К), что обуславливало длительное время термической релаксации микрокристалла  $\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{Pr}}$ , порядка 200–400 мс [3]. Тем не менее, как будет показано ниже, динамика изменения ЭПР-сигнала в процессе нагрева микрокристалла  $\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{Pr}}$  импульсным терагерцевым излучением позволяет с хорошей точностью определять длительность генерируемого импульса.

Рис. 4 демонстрирует регистрируемый осциллографом сигнал ЭПР-спектрометра при периодическом воздействии на образец макроимпульсами терагерцевого излучения. Период повторения терагерцевых импульсов задавался с учетом скорости термической релаксации образца и в проводимых экспериментах составлял  $\sim 1.1$  с. Как видно из рисунка, импульсное воздействие излучением приводит к нагреву образца и связанному с этим резкому уменьшению интенсивности сигнала. Дальнейшее восстановление интенсивности сигнала ЭПР до исходного значения происходит на временах термической релаксации образца.

Динамика изменения сигнала ЭПР во время воздействия терагерцевого макроимпульса представлена на рис. 5. Поглощение ТГц-излучения образцом приводит к практически линейному во времени изменению интенсивности ЭПР-сигнала, что позволяет с хорошей точностью определить длительность генерируемого макроимпульса терагерцевого излучения. Так, в эксперименте,



**Рис. 6.** Динамика изменения ЭПР-сигнала под действием терагерцевого излучения ЛСЭ, отражающая процесс нагрева образца. Длительность макроимпульса терагерцевого излучения составила  $\sim 600$  мкс.



**Рис. 7.** Динамика изменения ЭПР-сигнала под действием терагерцевого излучения ЛСЭ, отражающая процесс нагрева образца. Длительность макроимпульса терагерцевого излучения составила  $\sim 70$  мкс.

приведенном на рис. 5, длительность макроимпульса составила  $\sim 2.5$  мс.

Меняя значения  $M$  и  $N$  первого и второго таймеров, можно добиваться различных значений длительности макроимпульсов, а также частоты

их повторения. Рис. 6 наглядно демонстрирует динамику изменения ЭПР-сигнала образца при воздействии терагерцевым импульсом длительностью  $\sim 600$  мкс.

Учитывая скорость обмена данными между генераторами и компьютером под управлением операционной системы реального времени LynxOS v3.1, можно сказать, что используемый стенд не позволяет генерировать макроимпульсы короче 16 мкс. В проводимых экспериментах мы не ставили целью генерацию предельно коротких макроимпульсов, но, тем не менее, смогли получить стабильную генерацию импульсов длительностью  $\sim 70$  мкс (рис. 7).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система модуляции мощности излучения терагерцевого лазера на свободных электронах обладает несомненными преимуществами по сравнению, например, со схемой механической модуляции излучения вращающимся сектором. Предлагаемый подход позволяет в широчайших пределах регулировать как среднюю мощность терагерцевого излучения, так и длительность отдельных макроимпульсов, что несомненно найдет применение в будущих экспериментах пользователей излучения терагерцевого ЛСЭ.

Настоящее исследование было поддержано грантом 14-50-00080 Российского научного фонда (разработка и создание испытательного стенда) и грантом 17-13-01412 Российского научного фонда (проведение тестовых экспериментов с модулированным излучением).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko O.A., Arbuzov V.S., Vinokurov N.A. et al.* // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 13.
2. *Kuzmin A.V., Shevchenko O.A., Vinokurov N.A.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2005. V. 543. № 1. P. 114.
3. *Kubarev V.V.* // Quantum Electron. 2009. V. 39. № 3. P. 235.
4. *Veber S.L., Tumanov S.V., Fursova E.Y. et al.* // J. Magn. Reson. 2018. V. 288. P. 11.
5. *Ovcharenko V.I., Maryunina K.Y., Fokin S.V. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2004. V. 53. P. 2406.
6. *Veber S.L., Fedin M.V., Maryunina K.Y. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2013. V. 117. P. 1483.