

## ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЯ РАЗВЕРТКИ

*Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин, В. В. Мисько, В. М. Тараканов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

### Введение

При детектировании лазерного излучения и лазерной плазмы широко применяются фотохронографы со щелевой развёрткой. Как правило, генераторы напряжения развёртки в этих приборах выполняют на основе схем на лавинных транзисторах. Лавинные схемы развёртки применялись и хорошо себя зарекомендовали на таких лазерных установках, как «Искра-4», «Искра-5», «Луч» и на других[1]. Однако лавинным схемам присущи такие недостатки, как сложность изготовления, необходимость индивидуальной настройки каждого прибора, высокая чувствительность к электромагнитным помехам. Поэтому такие схемы подходят для приборов в единичном исполнении.

Для создания системы диагностики лазерного излучения на многоканальной лазерной установке нового типа необходимо большое количество фотохронографической аппаратуры (~50). Это потребовало разработки нового генератора напряжения развёртки, удовлетворяющего требованиям технологичности и надёжности.

### 1. Особенности схем на лавинных транзисторах

В первую очередь стоит определить термин – «лавинный транзистор». В тексте все транзисторы способные работать в режиме лавинного пробоя (лавинном режиме) будут называться лавинными. Стоит упомянуть, что современная зарубежная промышленность выпускает специальные транзисторы, которые работают только в лавинном режиме.

Ранее авторами были разработаны и изготовлены ряд схем, основанных на лавинном пробое транзисторов [2]. В результате многолетней эксплуатации подобных схем, были выявлены недостатки. Наиболее важные из них следующие:

1. Каждый прибор с развёрткой на лавинном коммутаторе (цепочка лавинных транзисторов) обладает индивидуальными свойствами. При этом

замена лавинного ключа (или его элементов) требует повторной калибровки прибора, по задержке пуска и линейности.

2. Изготовление развёртки или ремонт требуют отбора транзисторов по подобию характеристик лавинного пробоя.

3. Поскольку в электронной промышленности происходит постоянная смена технологии производства транзисторов, многие типы ранее используемых транзисторов становятся не работоспособными в лавинном режиме. Приходится постоянно искать новые марки полупроводников

4. Изготовление электроники фотохронографов на заводе, если в этом возникнет необходимость при мелкосерийном производстве невозможно, поскольку как указано в п.2 нужно отбирать транзисторы по подобию характеристик лавинного пробоя.

5. Ремонт разверток при большом количестве приборов из-за сложности и специфики фактически может потребовать создание ремонтной бригады т.к. частота выхода электроники из строя приблизительно 1 прибор в 3 года по разным причинам. Т.е. на 50 приборов ( $50 \cdot 1/3 = 16,7$ ) почти 17 поломок в год.

### 2. Краткий обзор существующих видов время-анализирующих ЭОП

К настоящему моменту в мире существуют три типа времяанализирующих ЭОПов. Все они строят управляемое электронное изображение фотокатода на экране с люминофором.

Первый тип передает изображение с катода на экран, с сохранением пространственного разрешения при любом положении штриховой миры на катоде относительно пластин развёртки, применим в щелевом и кадровом режимах.

Второй тип применим только в щелевом режиме. Передает на экран только горизонтальные штрихи (параллельные направлению развёртки). Перестраивает широкую щель на фотокатоде

в узкую на экране. Такая электронная оптика с цилиндрической составляющей удобна для регистрации ближней зоны – времени, изучение ударных волн и т.п. Применяется в основном в США и Канаде и является одной из попыток борьбы с электростатической катодной линзой, возникающей при перегрузке катода. Это результат борьбы за повышение динамического диапазона регистратора.

Третий тип применяется и изготавливается в Японии. Это модификация первого типа ЭОП, но с экраном расположенным под некоторым углом к оси ЭОП, что позволяет в значительной степени сохранить качество передаваемого изображения и управлять времяанализирующей электронной оптикой по одной пластине при глухо заземленной второй. Разработка подобных ЭОП вызвана попыткой предельно упростить скоростную электронику управления пластиной развертки. Основным недостатком – это хорошее временное и пространственное разрешение только в середине экрана.

В России все производимые ЭОП относятся к первому типу: т. к. являются модификацией образцов изготовленных на начальном этапе разработки фотохронографов. Динамический диапазон российских ЭОПов как минимум не уступает второму типу, т. к. успешно увеличена проводимость фотокатода.

Покупка ЭОП зарубежного производства затруднена.

Хронографы отечественного производства, как показывает длительная практика использования, нас постоянно чем-то не устраивали. Используя трубки и изготавливая прибор сами, мы подбираем оптимальную конфигурацию, оптимизируя соотношение длительности развертки, динамического диапазона, усиления, временного и пространственного разрешения. Также остро стоит проблема ремонта – сами мы быстрее и качественнее ремонтируем приборы. Производители выпускают приборы не адаптированные специально для работы на крупных установках типа «Искра-5» или аналогичных. Приборы, как правило, неустойчивы к электромагнитным помехам и имеют недопустимо большие  $\sim(20-100)$  нсек задержки запуска.

В последнее время нами был проведен анализ характеристик ЭОПов российского производства для использования в наших хронографах. Среди них лучшими оказались ЭОПы производства НИИИТ – СПО 9,20,23 [2].

### 3. Выбор схемы развертки

Имея опыт изготовления фоторегистраторов [2] на ЭОПах типа СПО производства НИИИТ и

типа ПИМ производства ВНИИОФИ можно сразу сформулировать основное требование к схеме генератора напряжения развертки: перепад напряжения на пластинах должен быть линейным, симметричным, обеспечивающим отсутствие динамической линзы. Появление динамической линзы на разворачивающихся пластинах приводит к расфокусировке изображения на экране и как следствие, потере временного и пространственного разрешений.

В схемах на лавинных коммутаторах обычно используется двуполярная симметричная схема генератора Маркса, выдающая симметричный двуполярный перепад напряжения. На пластины подается перепад, откорректированный при помощи пассивных RCL цепей для получения требуемых длительности и линейности напряжения на пластинах. Схема хорошо себя зарекомендовала при применении четного количества лавинных транзисторов. При этом эмиттер пускового транзистора, который заземлен паразитной емкостью схемы запуска, как в режиме ожидания пуска, так и в процессе генерации перепада напряжения, находится практически под нулевым напряжением относительно земли ЭОП и прибора в целом.

Очевидно, что подобную идеологию построения развертки необходимо сохранить.

В последние годы, благодаря развитию электроники, появились полевые транзисторы, которые способны обеспечить как высокий перепад напряжения, так и высокую скорость включения. Вследствие чего, появилась возможность попробовать использовать полевые транзисторы в качестве быстрых ключей для генераторов развертки.

В отличие от коммутатора на лавинных транзисторах, который фактически является полупроводниковым разрядником со схемотехнической точки зрения, полевые транзисторы управляемы (см. рис. 1). Это обстоятельство позволяет применять их в режиме скоростного стабилизатора тока (см. рис. 2), что исключает из схемы громоздкие настраиваемые высоковольтные корректирующие RCL цепи. В результате отработки было изготовлено и испытано несколько разверток с различными схемотехническими решениями. В итоге авторы остановились на схеме, представленной на рис. 3.

Схема является зеркально симметричной в высоковольтной части (VHP и VHN) относительно замены + на – и смены направления тока. Дополнительная симметрия достигается применением комплементарных пар транзисторов, как силовых полевых (vp0505 и vn0550), так и управляющих биполярных. Разумеется, комплементарность под-

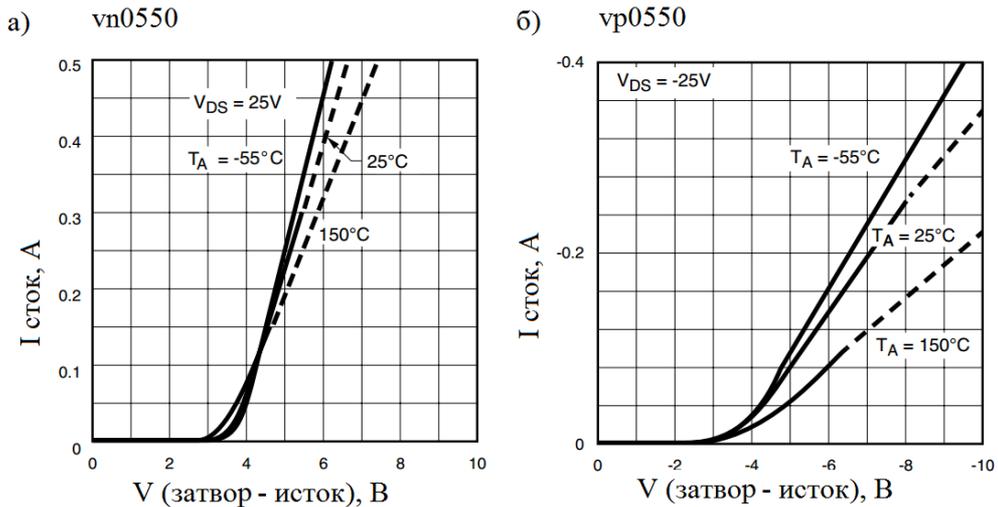


Рис. 1. Передаточные характеристики полевых транзисторов vn0550 и vp0550

разумеает подобие работы полупроводников с напряжениями, токами и временами отклика на управление указанными в паспорте (микросекундные и субмикросекундные отклики). При временах, на которые рассчитана корректная работа схемы развертки (наносекундные времена при субнаносекундной коррекции), были применены схемотехнические решения пассивной быстродействующей многопетлевой обратной связи.

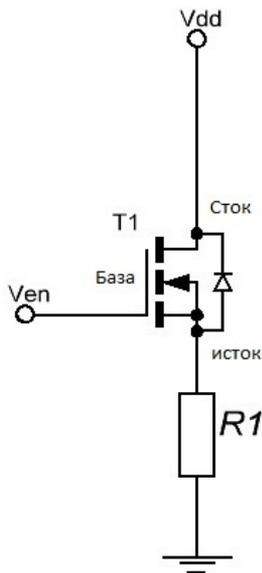


Рис. 2. Стабилизатор тока на полевом транзисторе

При практической реализации схемы было выяснено, что схема с применяемыми полупроводниками работоспособна с длительностями раз-

вертки не короче 15 наносекунд на экран ЭОПа типа СПО 23. Очевидно, что это связано с несимметрией масс электронов и дырок в полупроводниках (разная подвижность носителей), которая не может быть скорректирована примененными авторами обратными связями. Есть предположение, что препятствием для дальнейшего повышения быстродействия являются неустранимые распределенные сопротивления затворов полевых транзисторов, а также собственная емкость транзисторов сток-исток. Дальнейшее повышение быстродействия вероятно достижимо при появлении более скоростных пар полевых транзисторов.

#### 4. Описание принципов построения и работы генератора напряжения развертки

Основой силовой части генератора является симметричный стабилизатор тока с заземленными по высокой частоте затворами полевых транзисторов «плавающий относительно земли» «ключ» R3 и токозадающие резисторы R1, R2 (см. рис. 3).

Упрощенно схема работает следующим образом. Если сопротивление ключа R3 велико, то цепь разряда C1, C2 практически разорвана, и ток через силовые полевые транзисторы практически не течет. За счет утечки в полевых транзисторах падение напряжения на R1, R2, R3 точно равно минимально достаточному запирающему напряжению между истоками. Если ток разряда несколько возрос, то падение напряжения на резисторах увеличится и транзисторы прикроются, соответственно при излишнем закрытии

полевых транзисторов обратная связь увеличит ток, разряжая емкости затвор-исток. Таким образом схема непрерывно готова к запуску, и срабатывает в т. н. «беспяточном» режиме. Транзисторы при резком уменьшении резистора R3 (закрывание «ключа» – запуск) продолжают стабилизировать возросший ток, заранее находясь в подготовленном к этому процессу состоянии. Подобный режим позволяет минимизировать задержку пуска (которая все-таки, есть из-за распределенного сопротивления затворов ~1–1,5 нсек).

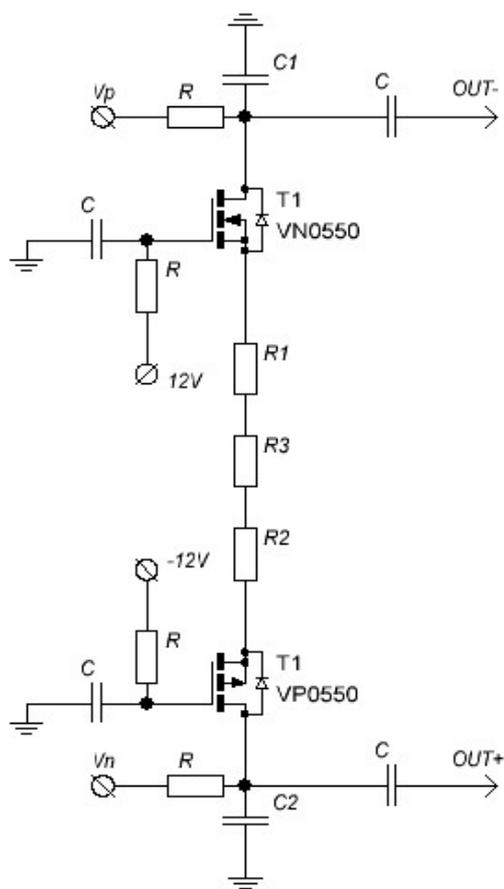


Рис 3. Упрощенная принципиальная схема ключевого каскада генератора развертки напряжения

При резком возрастании тока истоков транзисторы оказываются включенными в зеркально симметричную схему усилителей напряжения с общим затвором (схема с общей базой/затвором почти в 3 раза быстрее схемы с общим эмиттером/истоком). При этом, из-за принципиальной несимметрии ВАХ транзисторов на разных типах

проводимости, центральная точка между R1 и R2, ранее имевшая нулевой потенциал, его утрачивает, но при этом ток разряжает емкости C1 и C2 совершенно симметрично и линейно при их приблизительно одинаковой величине.

Изучение паспортов различных полупроводниковых управляемых коммутаторов показало, что создание полноценного коммутатора с отсутствием емкостной связи с землей, имитирующим поведения «ключа» R3, невозможно достичь желаемых параметров проектируемой схемы.

В результате была применена пусковая схема (тот элемент, что на упрощенной схеме изображен как R3) на биполярных комплементарных транзисторах, которыми управляют цифровые изоляторы (см. рис. 4 блок 2).

Единственным условием успешной работы схемы является более высокое быстродействие биполярной комплементарной пары в схеме с общим эмиттером, чем быстродействие токовых стабилизаторов в схеме с общим затвором. В такой схеме запуска, паразитная емкость минимально достижима, поскольку основная паразитная емкость – сосредоточена в источнике вторичного питания (12В => ±12В) – 50 пф. Потенциал источника плавает вместе с потенциалом «ключа» R3, необходимая принудительная коррекция происходит за счет симметричного потребления тока в цепи истоков транзисторов и не превышает 2 В, если руководствоваться паспортами на полевую пару. Это говорит о максимальном зарядовом перекосе  $\sim Q = C \cdot U = 2 \text{ В} \times 50 \text{ пФ} = 10^{-10} \text{ Кл}$ , что значительно меньше разряжаемого заряда полевым стабилизатором  $Q = C \cdot U = 1000 \text{ В} \cdot 10 \text{ пФ} = 10^{-8} \text{ Кл}$  при максимально быстрой развертке (см. рис. 3 C16, C18 ~ 10пф). В результате понятно, что теоретически невозможно реализовать симметрию схему лучше, чем с 1 % погрешностью из-за несимметрии ВАХ полевых транзисторов, что авторы посчитали приемлемым.

На принципиальной схеме не показаны паразитные RCL элементы, значительно влияющие на работу схемы, как и на работу любой ВЧ схемы. Для успешной сборки работоспособной развертки необходим симметричный монтаж и «беспятлевая» малоиндуктивная симметричная разводка печатной платы. При разводке печатной платы необходимо учитывать, что разность потенциалов на ней может достигать 1 кВ между некоторыми компонентами и дорожками.

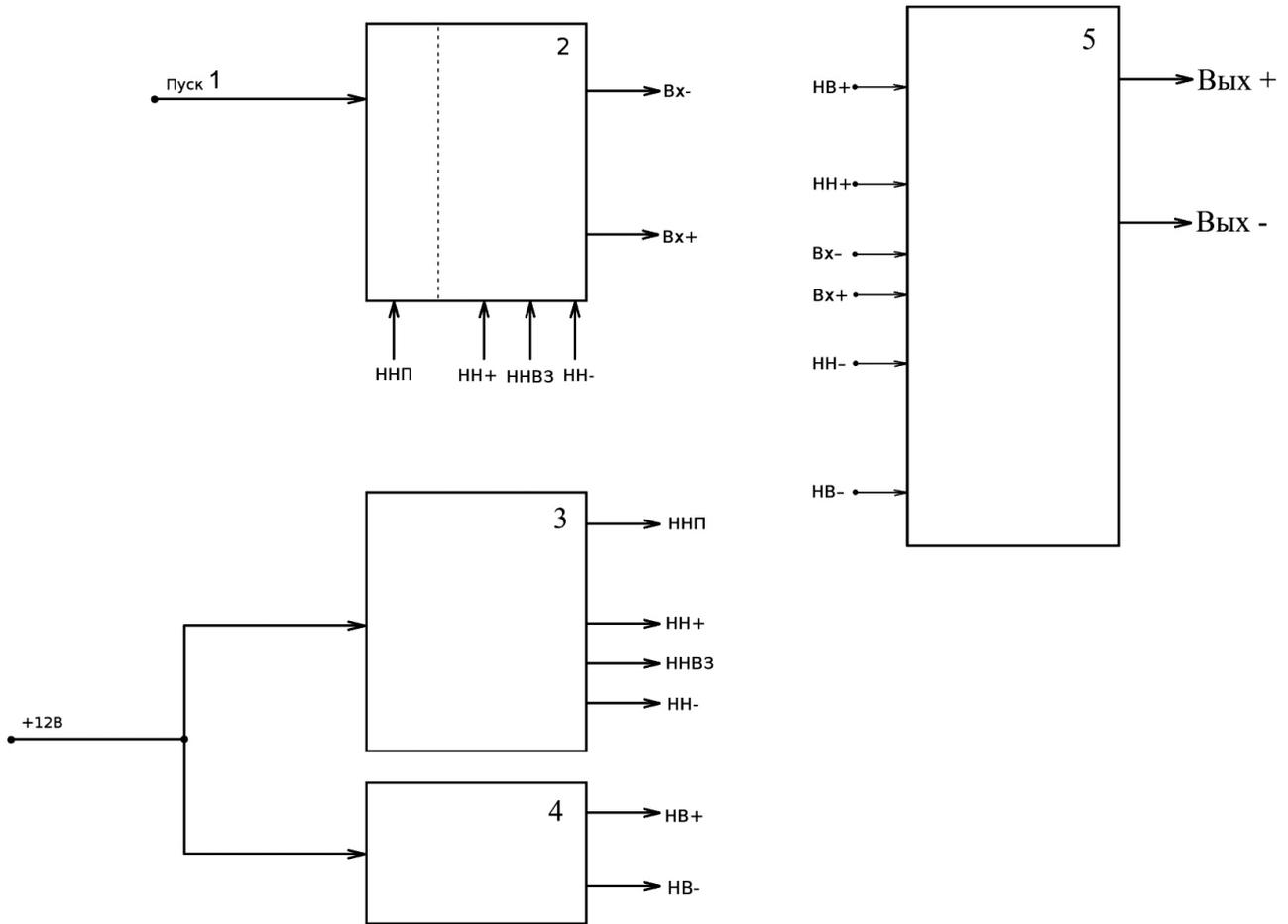


Рис. 4. Блок схема генератора напряжения развертки: 1 – пусковой вход; 2 – блок запуска; 3 – блок низкого напряжения; 4 – блок высокого напряжения; 5 – блок генерации

## 5. Практическая реализация развертки и испытание в составе фотохронографа с ЭОП СПО-23

Перед тестированием нового генератора напряжения развертки, было установлено что для того чтобы увести щель (луч) с экрана камеры на основе ЭОП СПО 23 нужно подать на разверточные пластины потенциалы  $+100/-100$ . Таким образом, нужно создать перепад потенциалов из  $+100/-100$  в  $-100/+100$  (от края до центра, и с центра до другого края), для хода луча от одного края экрана до другого.

Осциллограмма работы генератора напряжения развертки представлена на рисунке 5, скорость перепада 100 вольт за 10 нс на 1 канал (200 вольт суммарно 2 канала)

В результате осциллографических испытаний выяснено, что развертка имеет следующие характеристики:

1. задержка пуска  $\sim 20$  нс;
2. джиттер  $\sim 2$  нс (суммарный джиттер триггера и цифровых изоляторов).

Созданный генератор напряжения развертки на основе полевых транзисторов не потребовал дополнительной настройки и подбора элементов при его изготовлении.

Результаты регистрации фотохронографа с разработанной разверткой представлены на рисунке ба и пропись регистрации на рис. бб.

Ширина лазерного импульса по полувысоте  $T(\text{pix}) = 180$  пикселей, длительность лазерного импульса по полувысоте  $T(\text{ns}) = 2,8$  нс. Размер экрана в пикселах  $L(\text{pix}) = 1024$ . Тогда имеем длительность развертки на экране  $L(\text{ns})$ :  $L(\text{ns}) = L(\text{pix}) \cdot t(\text{ns}) / t(\text{pix}) = 1024 \cdot 2,8 / 180 \sim 16$

Т.е. длительность развертки 16 нс/экран.

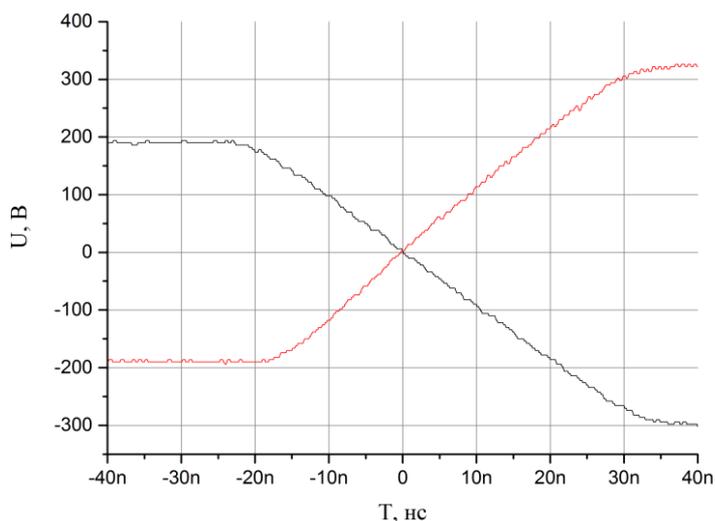


Рис. 5. Осциллограмма работы генератора напряжения развертки

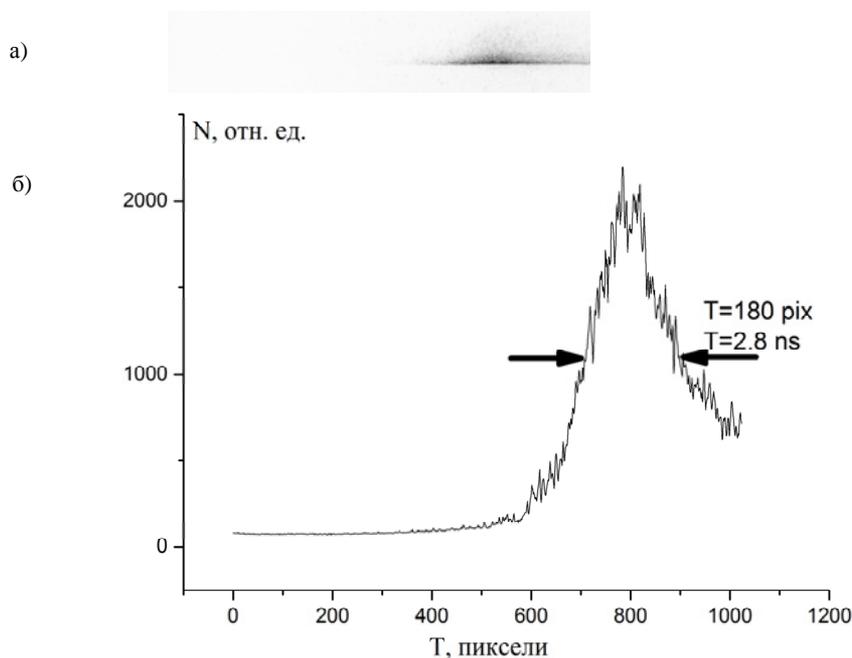


Рис. 6. а – Регистрация лазерного излучения, с тестируемым генератором развертки напряжения; б – Пропись регистрации лазера.

### 6. Заключение

Создан и протестирован генератор развертки напряжения на полевых транзисторах, для детектирования параметров лазерного излучения, со следующими характеристиками:

1) Длительность от 15 до 1000 нс/экран, что позволяет говорить о заполнении участка фотохронографии между наносекундными и микросекундными экспозициями. Ранее это был весьма проблемный временной диапазон фотохронографии.

2) Минимальная задержка запуска составил ~20 нс;

3) Джиттер на реализованном макете составил ~2 нс;

4) Нелинейность развертки составила 1 %;

5) Собранные схемы не нуждались в заранее отобранных транзисторах и дополнительной настройке.

При тестировании генератора напряжения развертки была подтверждена высокая повторяемость параметров.

На представленный в докладе генератор напряжения развертки в Роспатент подана заявка на изобретение № 2014153886 с приоритетом 29.12.2014, по которой получено решение о выдаче патента РФ от 18.01.2016.

### Список литературы

1. Муругов В. М., Окутин Г. П., Петров С. И. и Панкратов В. И. Применение электронно-

оптических преобразователей для регистрации излучения йодного лазера субнаносекундной длительности. ПТЭ, 1993. № 2, с. 155–161.

2. Корниенко Д. С., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н., Мисько В. В., Рукавишников А. Н., Сенник А. В., Стародубцев К. В., Тараканов В. М., Чаунин А. Е.. Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза. ПТЭ, 2014. № 2, с. 78–89.