

**П. И. Зайцев, Р. В. Неронский**

АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», Калуга, Россия

## **СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ**

*В статье описаны схемные решения, пригодные для модуляции излучения светодиодов по цепи питания при построении из них прожекторов большой мощности для нужд атмосферной оптической линии связи со скоростью модуляции 1÷4 Мбит/с. Рассмотрены особенности построения схем для одиночных светодиодов разных мощностей, а также возможность и целесообразность объединения светодиодов в гирлянды.*

**Ключевые слова:** АОЛС, модуляция мощных УФ-С светодиодов

Для цитирования: Зайцев П. И., Неронский Р. В. Схемные решения отдельных каскадов передающего тракта атмосферной оптической линии связи // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 50–59.

**P. I. Zaitsev, R. V. Neronskey**

Joint-stock Company Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, Kaluga, Russia

## **CIRCUIT SOLUTIONS OF SEPARATE CASCADES OF THE TRANSMISSION PATH OF THE ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINE**

*The article contains the circuits useful for modulation of the light emission diodes by the power feeding circuit in order to make the powerful light source for the purposes of constructing Atmosphere Optical Connection Line with the transfer rate 1÷4 M bit per second. Discussed the differences of circuitry for single LEDs of different power and the possibility and usefulness of the sequential LED circuits.*

**Keywords:** modulation of powerful LEDs.

For citation: Zaitsev P. I., Neronskey R. V. Circuit solutions of separate cascades of the transmission path of the atmospheric optical communication line. Radiopromyshlennost, 2017, no. 3, pp. 50–59 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2017-3-50-59

Обсуждаемые схемные решения прорабатывались в качестве перспективных вариантов доработки электронной части оптического модуля системы связи ОКР «Вилка», разработанного в Государственном оптическом институте (ГОИ).

В передающей части системы основным вариантом сотрудники ГОИ выбрали прожектор из шести ртутных ламп низкого давления, излучающих основную гармонику на длине волны 253,4 нм. Суммарная

электрическая мощность прожектора составила 54 Вт. Выбранная мощность оказалась способной пробить заданную толщину атмосферы (более 300 м), но скорость модуляции ламп оказалась недостаточной для обеспечения канала связи. В качестве перспективного варианта рассматривалось применение светодиодных излучателей, осваиваемых в производстве промышленностью. В настоящее время в применимом для нас диапазоне ультрафиолетового

Таблица 1. Освоенные в производстве светодиоды оптического диапазона УФ-С

Длина волны, нм	Прямой ток, мА	Световая мощность	Типоразмер
265	20	0,2÷0,5	SMD3535
270	20	0,5÷1,0	SMD3535
275	20	1,0÷1,5	SMD3535
280	20	1,5÷1,7	SMD5050
280	100	Не указывается	SMD5050 на радиаторе
280	150	Не указывается	SMD4545 на радиаторе
280	500	Не указывается	SMD6868 на радиаторе

спектра (прозрачность фильтров оптической части приемника) выпускаются светодиоды нескольких длин волн и нескольких мощностей (табл. 1).

Эксперименты проводились со светодиодом с длиной волны 275 нм и прямым током 20 мА и со светодиодом с длиной волны 280 нм и прямым током 150 мА.

В процессе экспериментов выяснилось следующее:

- светодиод имеет слабое свечение в видимой области длин волн в фиолетовой части спектра, благодаря чему отпадает необходимость в специальной индикации о включенном излучении (например, по наличию тока через светодиод);
- падение напряжения на светодиоде при протекании номинального тока составляет 6,6 В при пи-

тании постоянным током и 7,6 В при питании импульсным током.

Макетирование нескольких вариантов схем модуляции тока в светодиоде позволило остановиться на варианте схемы, показанном на рис. 1.

Источник тока собирается на полевом транзисторе 2П302В с последовательно включенным резистором. Сток транзистора соединен с положительным выводом источника питания, исток транзистора соединен с последовательно включенным резистором. Противоположный вывод резистора соединен с анодом светодиода, а катод светодиода заземлен (соединен с отрицательным выводом источника питания). Затвор транзистора подключен к точке соединения последовательного резистора и анода

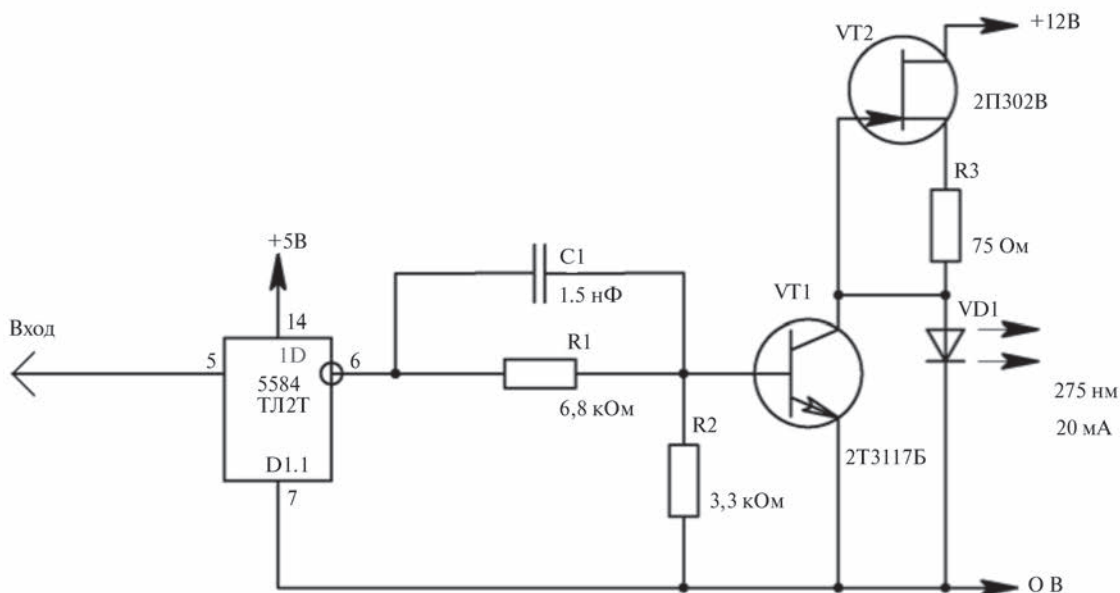


Рисунок 1. Базовый вариант схемы модуляции с источником тока на полевом транзисторе

светодиода, в результате чего образуется отрицательная обратная связь – увеличение тока через последовательный резистор увеличивает падение напряжения на нем; это напряжение является закрывающим напряжением на затворе транзистора и ограничивает дальнейший рост тока через транзистор; в результате ток через транзистор устанавливается на определенном значении и зависит от номинала резистора и от напряжения отсечки транзистора (имеющего технологический разброс и температурный дрейф). Подбор номинала резистора под имеющийся экземпляр транзистора позволил установить рабочий ток через светодиод равным 18,6 мА при номинале резистора  $75 \text{ Ом} \pm 5\%$  (измеренное значение – 77 Ом). Значение рабочего тока через транзистор в данной схеме имеет отрицательную температурную зависимость и после продолжительной работы устанавливается на уровне 16,3 мА, что для нашего случая положительно с точки зрения надежности. Номинал напряжения питания схемы определяется максимально допустимым значением напряжения «сток-затвор» для данного типа транзисторов, которое ограничено значением 20 В. Это, в свою очередь, определяет ограничения при масштабировании схемы по возможным рабочим токам светодиодов и возможности последовательного включения светодиодов при создании прожектора, о чем будет сказано ниже. Модуляцию в схеме осуществляет ключ на биполярном транзисторе структуры p-n-p, подсоединенный параллельно светодиоду, коллектором к аноду светодиода и эмиттером на землю. Ключ работает в импульсном режиме: в открытом состоянии он шунтирует на землю ток от источника тока, чем гасит светодиод, а в закрытом состоянии перенаправляет ток в светодиод, и тот начинает излучать свет. Характеристики транзистора при токах 20 мА большой роли не играют, поэтому был выбран самый доступный транзистор – 2Т3117Б. Базовый ток транзистора возбуждается от выхода мощного буферного логического элемента, способного работать на низкоомную нагрузку (импортный аналог микросхемы 5584ТЛ2) через резистор 6,8 кОм, шунтированный конденсатором 1,5 нФ (эквивалентное сопротивление 106 Ом на частоте 1 МГц).

Технические характеристики полученной схемы следующие (рис. 2а, 2б):

- Время включения светодиода – не более 75 нс.
- Характер нарастания напряжения на светодиоде аналогичен кривой заряда емкости через резистор (по экспоненте).
- Время выключения светодиода – не более 6 нс.
- Характер спада напряжения на светодиоде аналогичен кривой транзисторного каскада (резкий фронт с переколебанием).

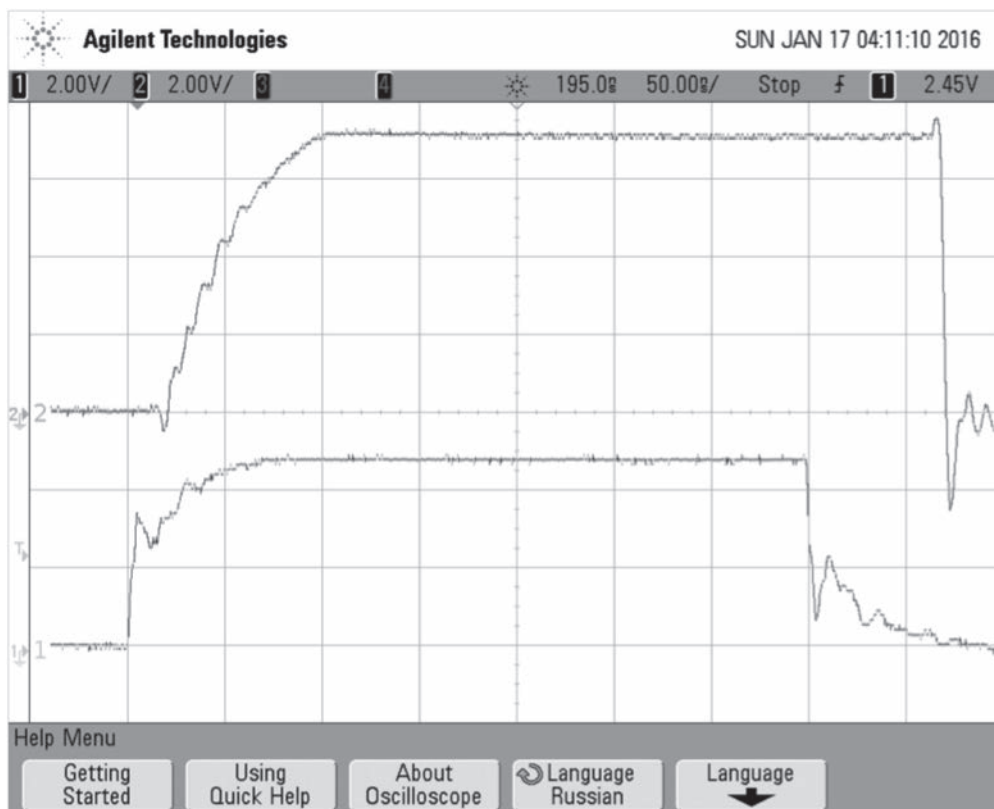
При форме сигнала «меандр» и длительности импульсов 1 мкс (как для скорости 1 Мбит/с) и при длительности 500 нс (как для скорости 2 Мбит/с) это дает небольшие преобладания нуля (рис. 2а). При длительности импульсов 100 нс (как для скорости 10 Мбит/с) сигнал принимает пилообразную форму и становится малоприменимым для передачи информации (рис. 2б).

Поскольку в момент гашения свечения полевой транзистор (переход «сток-затвор») находится под полным напряжением источника питания, это ограничивает напряжение питания величиной 20 В, а максимальное количество соединенных последовательно светодиодов – разницей между суммарным падением напряжения на гирлянде и питающим напряжением величиной порядка 4–4,5 В, что необходимо для функционирования источника тока на полевом транзисторе. При указанных типах транзисторов в данной схеме может быть не более двух последовательно включенных светодиодов. Увеличение количества последовательно включенных светодиодов потребует переработки схемы путем добавления биполярного транзистора структуры p-n-p в каскадном включении (с общей базой) между источником тока и последовательной цепью светодиодов, а также расщепления источника питания на два со средней точкой (рис. 3).

В этой схеме источник тока на полевом транзисторе с последовательным резистором питает эмиттер транзистора p-n-p, база его соединена со средней точкой источника питания, а коллектор – с анодом гирлянды светодиодов. Катод гирлянды соединен с землей. Модулирующий транзистор структуры p-n-p коллектором соединен с анодом гирлянды, а эмиттером – с землей. Напряжение нижней ветви источника питания зависит от количества последовательно включенных светодиодов и при падении напряжения на каждом порядка 7,6 В и пяти светодиодах в гирлянде будет  $7,6 \text{ В} \times 5 = 38 \text{ В} \rightarrow 40 \text{ В}$ . Верхняя ветвь источника питания обеспечивает рабочий режим источника тока, и достаточным для этого напряжением будет 5 В. Основной нагруженный элемент данной схемы – транзистор p-n-p. Он работает в режиме усиления и рассеивает порядка 1 Вт мощности ( $45 \text{ В} \times 20 \text{ мА} = 900 \text{ мВт}$ ). Этим обусловлен выбор типа p-n-p-транзистора – 2Т974А либо составной транзистор из мощного p-n-p- и маломощного p-n-p-транзисторов.

Возможно масштабирование схемы, собранной по рис. 1, с применением более мощных светодиодов. Так, при использовании светодиодов с рабочим током 100 мА в качестве полевого транзистора в источнике тока можно применить транзисторы 2П609А или 2П601А с теплоотводом. При применении светодиодов с рабочим током 150 и 500 мА для источ-

а)



б)

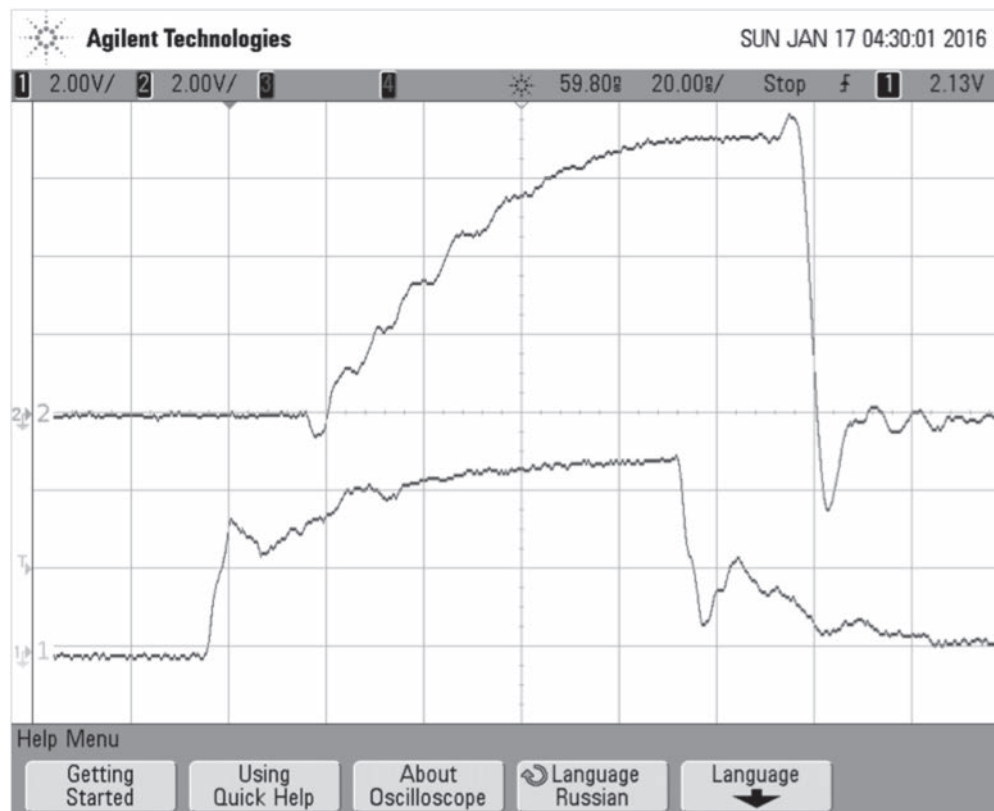


Рисунок 2. Осциллограммы напряжения на светодиоде: а – при длительности управляющего импульса 350 нс; б – при длительности управляющего импульса 100 нс

ника тока нужно применить транзистор 2П903А на теплоотводе, номинал последовательного резистора будет зависеть от технологического разброса начального тока стока транзистора 2П903А (номиналы

резистора для имеющегося экземпляра транзистора составили 26,7 Ом  $\pm$  1% для 150 мА и 1,0 Ом  $\pm$  1% для 500 мА соответственно), и мощность 1 Вт. В качестве модулирующего биполярного п-р-п-транзи-

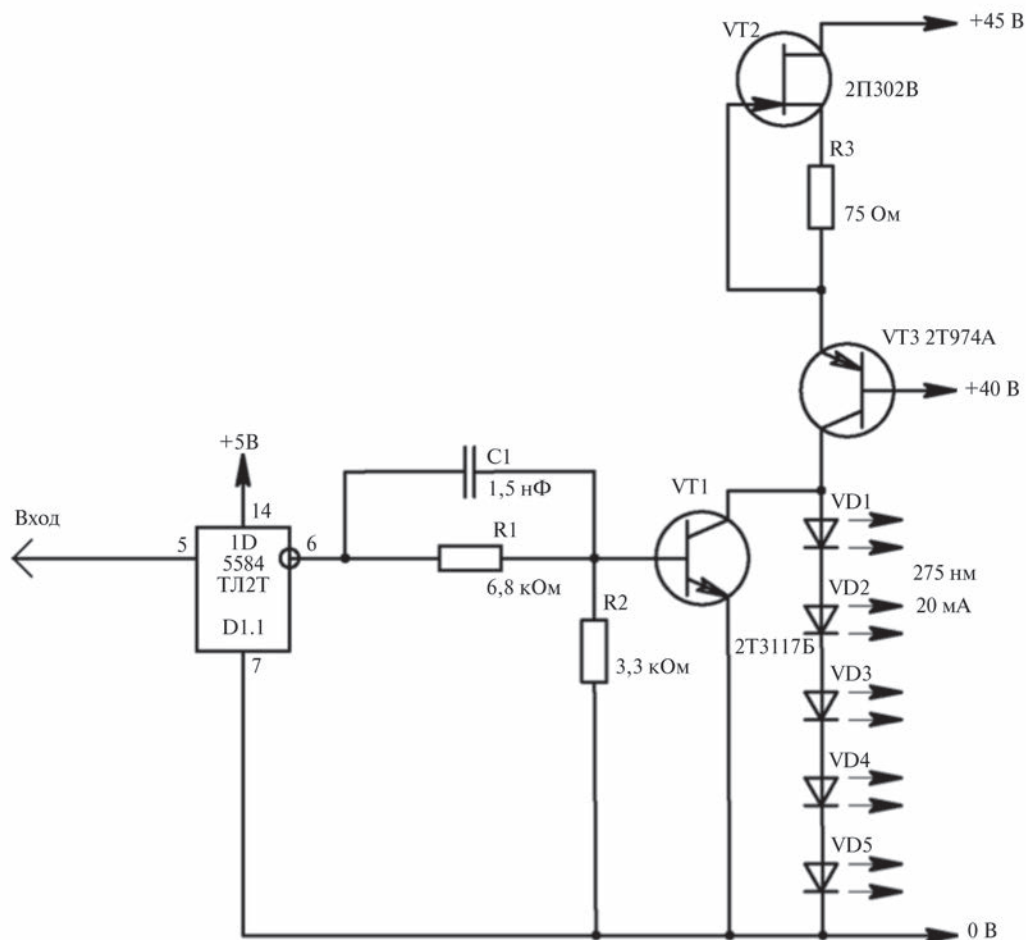


Рисунок 3. Вариант схемы с гирляндой светодиодов, питаемой одним источником тока и модулируемой одним транзистором

сторона можно применить следующие типы: 2Т603Б или 2Т624АМ-2 – для модуляции одиночных светодиодов, либо 2Т608Б или 2Т928Б – для модуляции одиночных светодиодов и гирлянд последовательно включенных светодиодов. Схема дополнительно усложняется за счет необходимости применения более сложной фильтрации цепей питания с целью предотвращения самовозбуждения и с целью недопущения обратного влияния помех от каскадов с большим током на формирователь цепи управляющего сигнала и на сам входной сигнал. На рис. 4 представлен вариант схемы модуляции одиночного светодиода с рабочим током 150 мА на полевом транзисторе 2П903А с теплоотводом, транзистором 2Т603Б в качестве модулятора и с 50-омным согласованным высокочастотным входом. В качестве стабилизатора напряжения питания формирователя (на схеме 78L05) возможно применение любого стабилизатора на 5 В с током более 100 мА – например, 1244HE05.

Частотно-временные характеристики полученного сигнала лучше, чем у схемы с маломощным све-

одиодом, – фронт сигнала длится менее 20 нс, а спад – около 10 нс (рис. 5).

Если рассматривать последовательное включение в гирлянду мощных светодиодов, падение напряжения на светодиоде с током 500 мА ожидается порядка 8,5–11 В (сведения в источниках разнятся), минимально необходимое падение напряжения для нормальной работы источника тока на транзисторе 2П903А – не менее 7 В, что в сумме дает напряжение питания схемы, равное 15,5–18 В, а максимальное напряжение для перехода «затвор-сток» у этого транзистора 20 В, из чего следует, что последовательное включение таких мощных светодиодов без применения каскодной схемы невозможно. В каскодном включении потребуется применить мощный высокочастотный р-п-р-транзистор (2Т932А) либо составной транзистор по комплементарной схеме (рис. 6). Мощность силового транзистора каскада будет определяться напряжением питания гирлянды (т. е. количеством последовательно включенных светодиодов) и током светодиода; при напряжении 48 В (6 светодиодов) и токе 500 мА мощность силового транзистора составит 24 Вт.

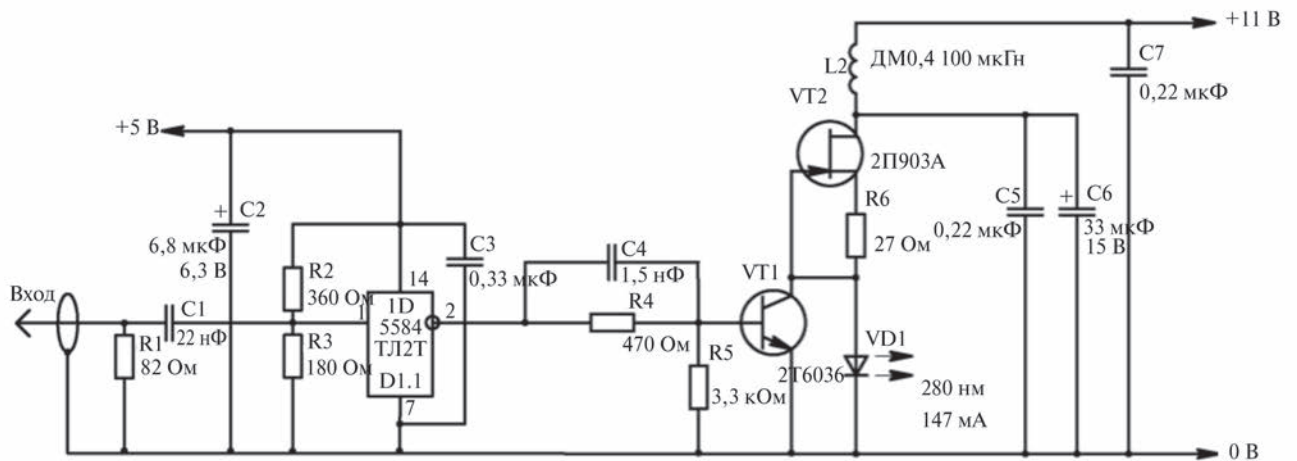


Рисунок 4. Схема питания и модуляции одиночного светодиода с током 150 мА

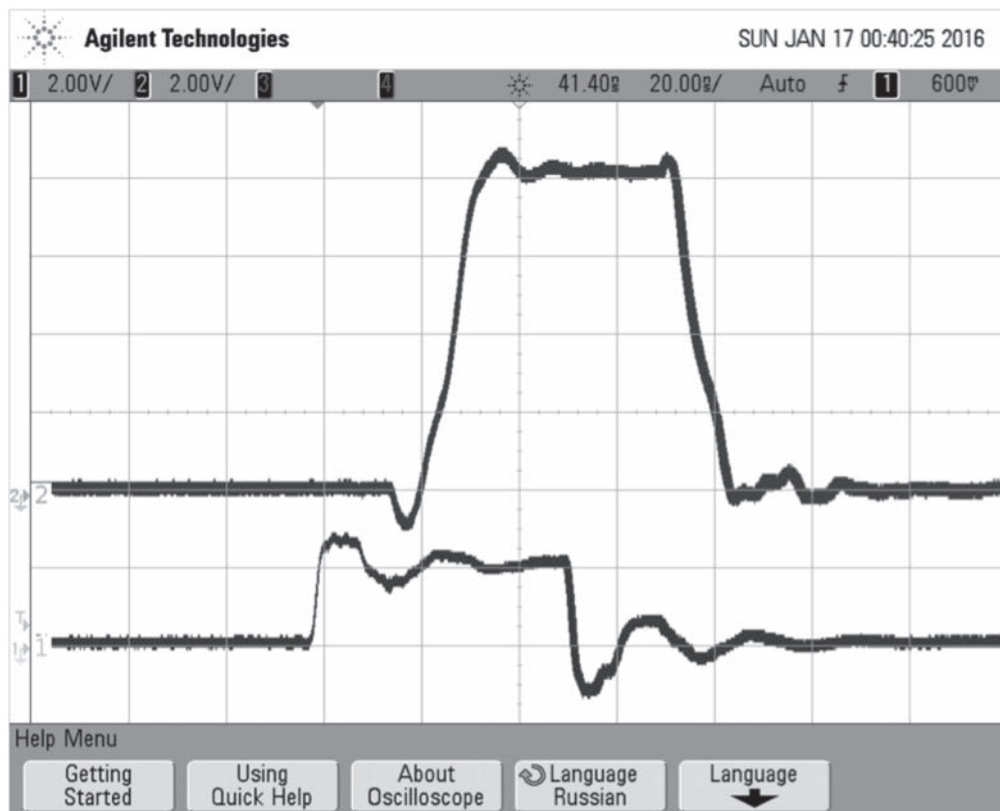


Рисунок 5. Осциллограмма напряжения на светодиоде с прямым током 150 мА (длительность управляющего импульса – 50 нс)

Исследование работы гирлянды и питающих ее цепей на больших токах, ввиду отсутствия достаточного количества УФ-светодиодов, проводилось на других полупроводниковых приборах. Были испытаны: гирлянда из 14 выпрямительных диодов КД208А с суммарным падением напряжения 11 В, гирлянда из 4 стабилитронов Д815 с падением напряжения 48 В, и гирлянда из 14 светодиодов с длиной волны 445 нм и с падением напряжения 47–50 В. Результаты исследований сведены в табл. 2. Для

сравнения в эту же таблицу внесены результаты экспериментов с одиночными приборами и с гирляндой из 2 и 3 маломощных УФ-светодиодов  $\lambda = 275$  нм с током 20 мА.

Исследование схем с гирляндой показало, что при токах светодиодов 20 мА работа в гирлянде возможна. При этом:

- сама схема с каскадным соединением транзистора вносит дополнительные задержки;



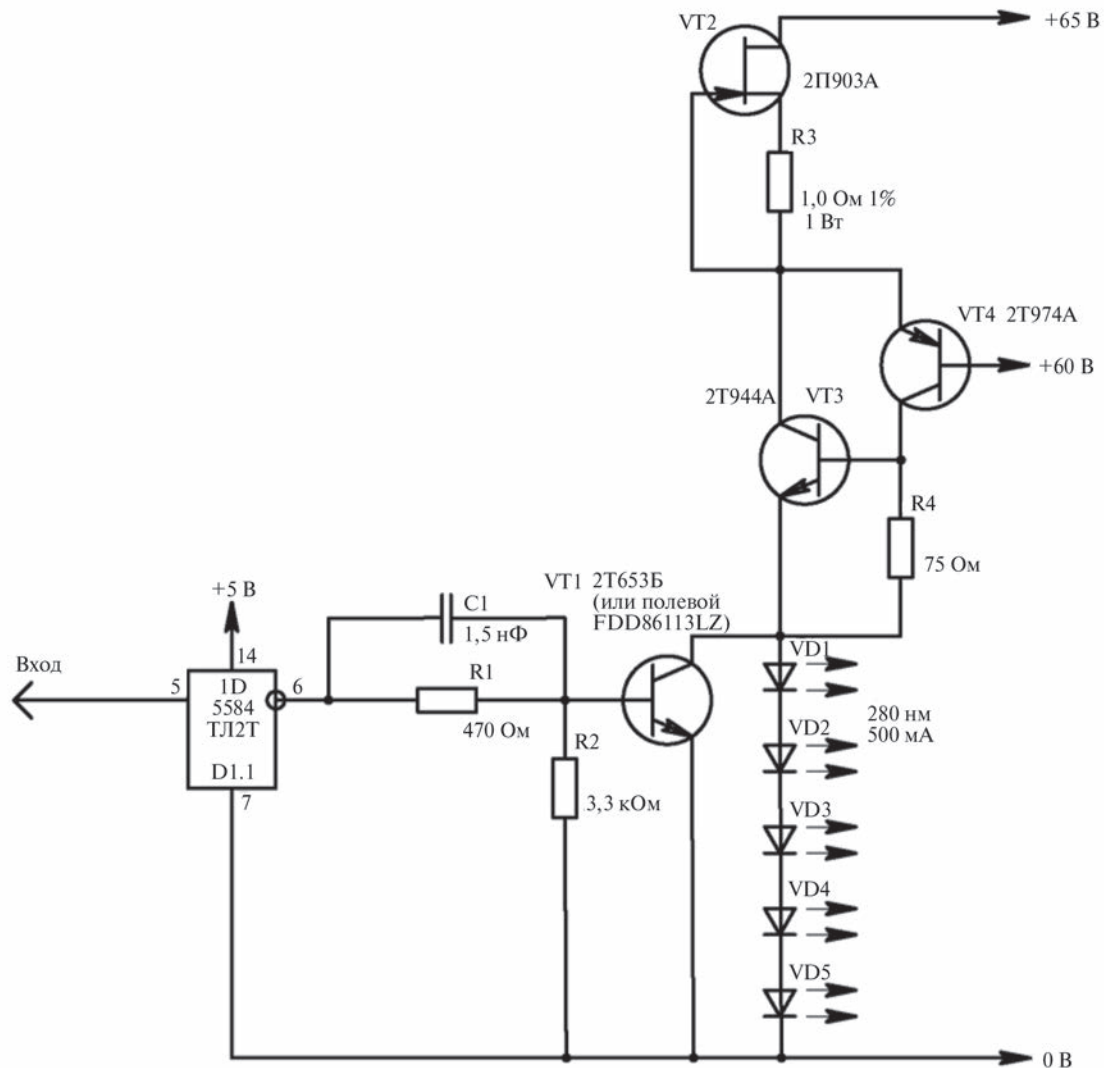


Рисунок 6. Вариант схемы с гирляндой светодиодов, питающейся от мощного каскадного составного транзистора

- чем длиннее гирлянда, тем большая величина задержки при включении – это обусловлено, вероятно, ростом индуктивности гирлянды;
- работа модулирующего транзистора также вносит свои задержки, особенно большие во время включения светодиодов (транзистор при этом закрывается) – это видно из сравнения работы различных видов приборов с работой реле;
- количество последовательно включенных светодиодов в гирлянде разумно ограничить шестью штуками, чтобы напряжение питания не превышало 50 В, в противном случае повышаются требования к текстолиту и межпроводниковым зазорам печатной платы при воздействии влаги.

Из совокупности приведенных факторов вытекает, что построение гирлянд из маломощных све-

одиодов (с током 20 мА) нецелесообразно, поскольку выигрыш в количестве транзисторов обслуживающей схемы (5 полевых транзисторов и 4 биполярных транзистора) перекрывается проигрышем по временным характеристикам (45 нс на каждый дополнительный светодиод в гирлянде или суммарно 305 нс на всю гирлянду из 6 светодиодов), что означает или примирение с 30% преобладания в сигнале на передающем конце при скорости 1 Мбит/с, или снижение скорость передачи.

Из табл. 2 также видно, что светодиоды с большим током обладают и большим быстродействием, что позволяет предположить, что и гирлянда из них будет более скоростная.

Но даже если гирлянды не удовлетворяют нашим требованиям (в частности, по быстродействию), перспективными окажутся схемы с параллельным

Таблица 2. Результаты исследований

Одиночный прибор или гирлянда	Рабочий ток, мА	Транзистор источника тока	Прибор модулятора	Прямое падение напряжения, В	Длительность переднего фронта, нс	Скорость нарастания, мВ/нс	Особенности формы фронта	Длительность заднего фронта, нс	Скорость спада, мВ/нс	Особенности формы спада
1 УФ-светодиод $\lambda = 275$ нм	20	КП302В	КТ3117Б n-p-n	7,6	75	93	Экспонента с возбуждением	$\leq 5$	1400	–
1 УФ-светодиод $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	2Т603Б n-p-n	8,2	$\geq 80$	103	–	$\leq 5$	1640	–
2 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	2Т603Б n-p-n	16,3	$\geq 125$	130	–	$\leq 5$	3260	–
3 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	2Т603Б n-p-n	23,8	$\geq 170$	140	–	$\leq 6$	3967	–
3 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	КТ3117Б n-p-n	23,8	$\geq 180$	132	–	16	1488	–
2 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	АРМ 2014N n-МОП	17,0	$\geq 500$	34	–	80	213	–
3 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + 2Т933А	FDT 86113LZ n-МОП	24,5	$\geq 320$	77	–	7	3500	–
3 УФ-светодиода $\lambda = 275$ нм	20	2П302В + КТ606А	РЭС-55А реле	23,0	$\geq 70$	329	–	4	5750	–
1 УФ-светодиод $\lambda = 280$ нм	140	КП601А	2Т603Б n-p-n	8	10	800	–	8	1000	–
1 УФ-светодиод $\lambda = 280$ нм	140	2П903А	2Т603Б n-p-n	8,2	12	670	–	10	800	–
Д815Д	325	2П903А	АРМ 2014N n-МОП	12,4	85	146	–	$\leq 25$	496	–
$R = 22$ Ом	480	2П903А	2Т908А+2Т603Б n-p-n	9,25	300	37	–	12	917	–
$R = 23$ Ом	480	2П903А	АРМ 2014N n-МОП	9,5	35	257	–	$\leq 20$	450	–
14 КД208А	480	2П903А	2Т908А+2Т603Б n-p-n	15÷10	350	31	–	25	440	–
14 КД208А	480	2П903А	АРМ 2014N n-МОП	17÷10	40	275	–	$\leq 10$	1100	–
14 КД208А	480	2П903А	2Т9128А n-p-n	16÷10	300	37	–	20	550	–
4 Д815	325	2П903А+ 2Т908А	2П7209А p-МОП	- 48	50	960	–	$\geq 750$	64	–
5 светодиодов $\lambda = 445$ нм	469	2 пары 2П903А+ 2Т932А	АРМ 2014N n-МОП (упр. 5В)	16,5 ÷ 17,5	90	178	–	22	727	–
5 светодиодов $\lambda = 445$ нм	469	2 пары 2П903А+ 2Т932А	АРМ 2014N n-МОП (упр. 2В)	16	80	200	–	120	133	С возбуждением
14 светодиодов $\lambda = 445$ нм	469	2 пары 2П903А+ 2Т932А	2Т908А n-p-n	48	600	80	С возбуждением	700	69	–
14 светодиодов $\lambda = 445$ нм	469	2 пары 2П903А+ 2Т932А	IRF740 n-МОП	48	520	92	Нестабильная траектория с возбуждением	80	600	–



Таблица 3. Готовящиеся к освоению в производстве светодиоды оптического диапазона УФ-С

Длина волны, нм	Прямой ток, мА	Световая мощность	Типоразмер
280	350	Не указывается	SMD6060 на радиаторе
280	650	Не указывается	SMD8080 на радиаторе
280	850	Не указывается	SMD8080 на радиаторе
280	1100	Не указывается	Нет данных

включением мощных светодиодов. За прошедшие 4 месяца 2017 г. появились новые типономиналы светодиодов (табл. 3).

Светодиоды с таким большим током в конструктивном исполнении SMD8080 на радиаторе уже не нужно собирать в гирлянду, в том числе и из соображений отвода тепла от всей схемы. В такой схеме для создания источника тока, питающего один светодиод, потребуется соединить параллельно два или три транзистора 2П903А (каждый со своим токозадающим резистором), а в качестве модулирующих приборов поставить высокоскоростные n-МОП транзисторы, либо транзисторные сборки 2Т9128А, либо сильноточные БТИЗ-транзисторы (рис. 7).

В данной схеме при применении светодиодов с током 650 мА и прямым падением напряжения на светодиоде 10,15 В (рис. 8) электрическая мощность составит 6,6 Вт, а для достижения мощности 54 Вт, предложенной специалистами ГОИ, потребуется прожектор из 10 таких модулей, состоящих из светодиода и предлагаемой схемы питания и управления. Даже если световая отдача светодиодов в два раза хуже, чем у газоразрядных ламп, и таких моду-

лей в прожекторе нужно установить не 10, а 20, – данное обстоятельство не снижает перспективности предлагаемого технического решения оптического передатчика в текущих условиях.

На осциллограмме (рис. 8) видны задержка на 65 нс импульса напряжения на светодиоде и сокращение длительности импульса напряжения на светодиоде до 215 нс по сравнению с управляющим импульсом 250 нс – т. е. 14%-ное преобладание, возникающее в оборудовании передатчика.

### Вывод

Перечисленные выше схемотехнические решения позволяют собрать из отдельных светодиодов прожектор нужной световой мощности (1÷5 Вт) и желаемой скорости (1÷4 Мбит/с). Проблемы синхронного зажигания и гашения отдельных параллельно работающих светодиодов и гирлянд светодиодов в настоящий момент не рассмотрены и предполагают макетирование и испытание на имеющихся фотоприемных узлах после доработки частотно-временных характеристик приемника до значений, сравнимых с характеристиками передатчика.

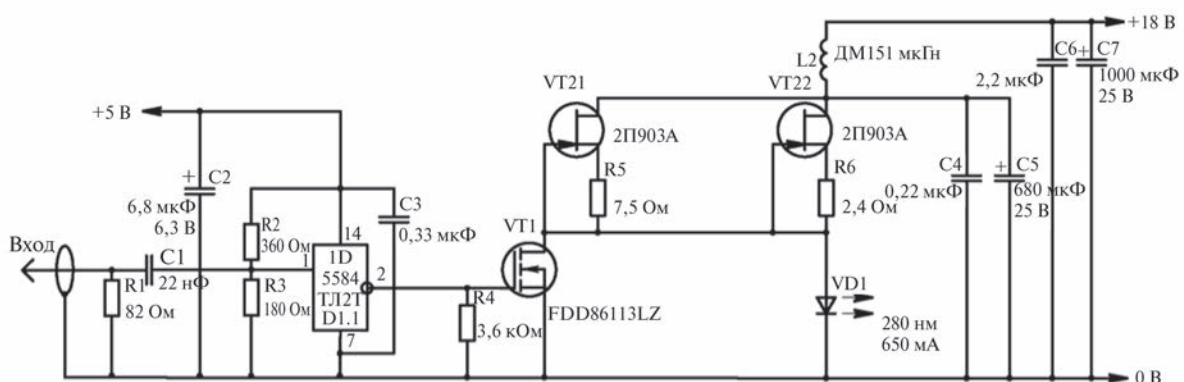


Рисунок 7. Схема питания мощного светодиода от двух параллельных источников тока

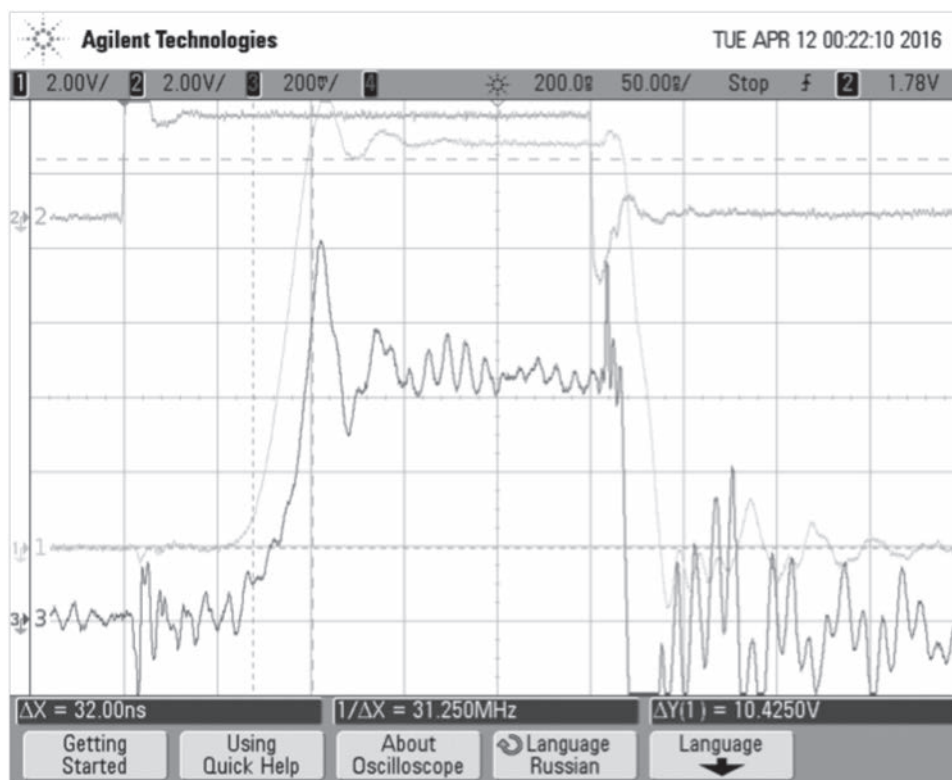


Рисунок 8. Осциллограмма импульса на мощном светодиоде в схеме рис. 7: луч 2 – управляющий импульс длительностью 250 нс; луч 1 – импульс напряжения на светодиоде 280 нм 650 мА; луч 3 – импульс на измерительном резисторе – датчике тока

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3 т. / пер. с англ.; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1993. С. 371, 367, 413.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство / пер. с нем. М.: Мир, 1983. С. 9–512.

## REFERENCES

1. Horowitz P., Hill W. *Iskusstvo shemotehniki* [The art of circuitry]. Trans. From Eng. 4-e izd., pererab. i dop. Moscow, Mir Publ., 1993, pp. 371, 367, 413 (In Russian).
2. Tietze U., Schenk Ch. *Poluprovodnikovaja shemotehnika: spravochnoe rukovodstvo* [Semiconductor circuitry: reference manual]. Trans. from Germ. Moscow, Mir Publ., 1983, pp. 9–512 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Зайцев Павел Иванович**, начальник сектора, АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», 248000, Калуга, ул. К. Маркса, д. 4, тел.: 8 (4842) 743-500, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

**Неронский Роман Валентинович**, ведущий инженер, АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств», 248000, Калуга, ул. К. Маркса, д. 4, тел.: 8 (4842) 743-500, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

## AUTHORS

**Zaitsev Pavel**, head of sector, JSC Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, 4, ulitsa K. Marksa, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.

**Neronskey Roman**, lead engineer, JSC Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, 4, ulitsa K. Marksa, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (4842) 74-35-00, e-mail: kniitmu@kaluga.net.