

ПРИМЕНЕНИЕ ТИРАТРОНА ТПИ1-10к/50 В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ НАКАЧКИ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2013 г. П. П. Гугин

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13*

Поступила в редакцию 17.05.2012 г.

Описана конструкция модулятора на основе тиратрона ТПИ1-10к/50, обеспечивающего питание трубки газового лазера длиной 50 см, диаметром 5 см, с частотой следования импульсов до 5 кГц, током до 7 кА при напряжении до 10 кВ и длительности импульса тока на полувывоте порядка 23–25 нс. Представлены результаты испытаний, показывающие возможность использования данного тиратрона для накачки газовых лазеров в частотном режиме.

DOI: 10.7868/S0032816213020079

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время достигнут значительный прогресс в генерации мощных электронных пучков в открытом разряде [1, 2]. В частности, для одиночных импульсов получены токи десятки килоампер [3]. Для их использования в системах накачки газовых лазеров, в том числе на парах металлов, требуются приборы, способные коммутировать напряжения несколько киловольт с током несколько килоампер и временем коммутации 20–50 нс при различных частотах следования импульсов, вплоть до десятков килогерц.

Классическим примером таких приборов являются лампы и тиратроны с накаливаемым катодом. Однако они имеют ряд ограничений по току и времени коммутации, а тиратроны, к тому же, и по частоте следования импульсов.

В настоящее время, в эпоху быстрого развития полупроводниковых технологий, все чаще применяются в качестве коммутаторов полупроводниковые ключи (например, высокоточные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [4], мощные полевые транзисторы (MOSFET) или SOS-диоды [5]). В ряде работ показана возможность построения высоковольтных (десятки киловольт) высокоточных (несколько килоампер) коммутаторов на основе полупроводниковых ключей. Тем не менее, пока не удалось создать твердотельные коммутаторы, в которых совмещены одновременно высокое напряжение (киловольты), большие токи (килоамперы), малые времена коммутации (единицы и десятки наносекунд) и высокие частоты следования.

Большинства перечисленных недостатков лишены тиратроны с ненакаливаемым катодом (pseudospark switches) [6], в частности тиратроны ТПИ1-10к/50, способные коммутировать ток до

10 кА при анодном напряжении до 50 кВ и времени коммутации <50 нс.

Для обеспечения частотного режима мощных импульсов необходимо, чтобы электрическая прочность коммутатора после коммутации импульсной мощности восстанавливалась в течение единиц микросекунд.

В работе [7] было показано, что в тиратроне ТПИ1-10к/50 электрическая прочность восстанавливается уже через 2–4 мкс после коммутации одиночных импульсов тока амплитудой до 10 кА и длительностью 300 нс. В документации этого тиратрона указана максимальная частота следования импульсов 20 кГц. Таким образом, ТПИ1-10к/50 является перспективным коммутатором для построения генератора электронного пучка, в том числе и в частотном (единицы и десятки килогерц) режиме.

В данной работе представлены результаты разработки и испытаний модулятора для накачки газовых лазеров электронным пучком со следующими параметрами: напряжение коммутации до 10 кВ, ток тиратрона до 2.5 кА, ток пучка до 7 кА, длительность тока пучка 23–25 нс, частота следования импульсов до 5 кГц.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И КОММУТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРАТРОНОВ ТПИ

Конструкция тиратронов ТПИ аналогична конструкции классических двухсекционных тиратронов: имеются анод, градиентная сетка, катод, управляющая сетка и электрод предыонизации. Основное отличие, присущее тиратронам ТПИ, – использование в качестве источника тока разряда в безнакальном полем катодом оригинальной кон-

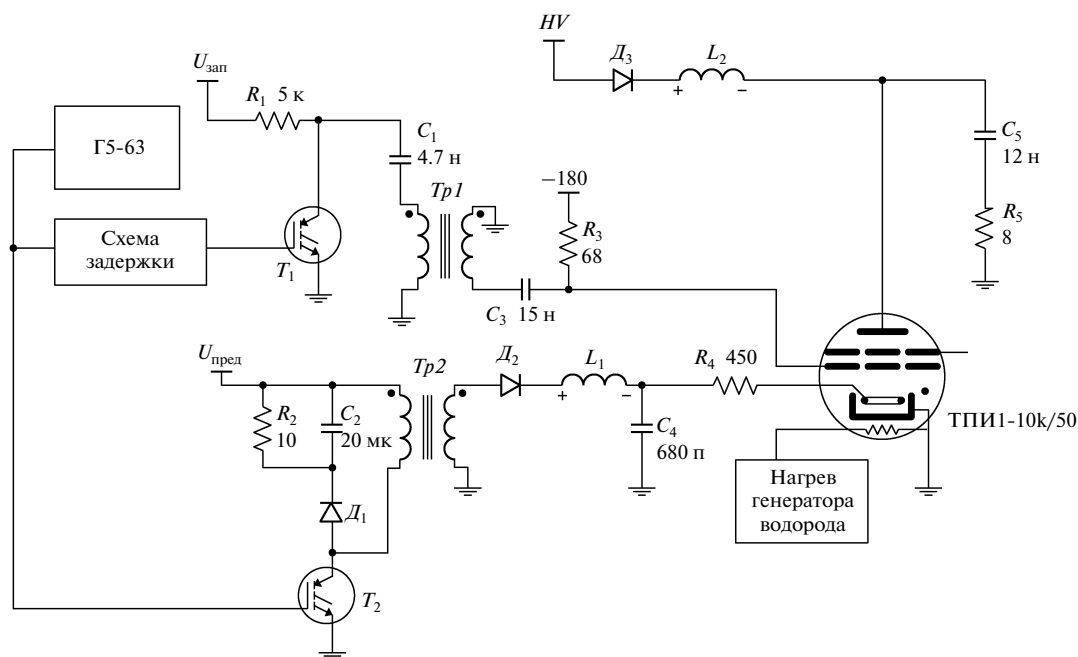


Рис. 1. Схема модулятора. T_1 – IRFPG50UD, T_2 – IRG4PH50UD; ТПИ1-10к/50 – тиратрон.

струкции [6]. Отсутствие нагретого до температуры свыше 800°C катода обеспечивает в прикатодной области, ответственной за формирование разряда, в 2–3 раза большую плотность водорода, что создает условия для снижения времени коммутации, а отсутствие постоянной эмиссии электронов ускоряет процесс деионизации после окончания импульса тока.

Схема управления тиратроном показана на рис. 1. Особенностью схемы является возможность независимой регулировки управляющих импульсов в очень широких пределах по напряжению, длительности, частоте следования (вплоть до 100 кГц), а также отсутствие цепи постоянной предыонизации.

Схема состоит из двух основных частей: генератора импульса предыонизации и генератора импульса запуска, управляемых одним задающим генератором Г5-63. При этом синхронизация импульсов осуществляется схемой задержки, которая позволяет изменять интервал между импульсами в пределах от 0.2 до 8 мкс, обеспечивая джиттер импульса на нагрузке тиратрона порядка 5 нс.

Генератор импульса предыонизации состоит из транзистора T_2 , повышающего трансформатора $Tp2$ и накопителя C_4 . Емкость накопителя подобрана опытным путем так, чтобы обеспечить стабильную работу тиратрона в максимально широком диапазоне частот, и составляет 680 пФ.

Дроссель L_1 формирует фронт импульса длительностью 0.5–1 мкс. Это, во-первых, снижает

нагрузку по току на ключевой транзистор, а во-вторых, повышает стабильность работы тиратрона. Резистор R_4 служит для ограничения максимального тока разряда предыонизации, что значительно снижает вероятность перехода тиратрона в режим самопробоя. Номинал резистора R_4 составляет 200–600 Ом, и его необходимо увеличивать по мере старения тиратрона. Генератор предыонизации имеет следующие выходные характеристики: амплитуда импульса напряжения до 6 кВ, амплитуда импульса тока до 30 А, длительность импульса до 10 мкс, длительность фронта 0.7 мкс, частота до 100 кГц.

Генератор импульсов запуска состоит из транзистора T_1 , повышающего трансформатора $Tp1$, разделительного конденсатора C_3 и схемы смещения потенциала управляющей сетки. Как показали испытания, тиратрон не очень чувствителен к форме и энергии импульса запуска и стабильно запускается при амплитуде импульса 2.5 кВ, при этом время коммутации практически не изменяется при изменении длительности фронта импульса в пределах от 10 до 50 нс. Это позволило значительно упростить схему генератора запуска и использовать в ней повышающий трансформатор. Генератор импульсов запуска имеет следующие характеристики: амплитуда импульсов напряжения до 5 кВ, длительность фронта 15 нс, частота повторения до 100 кГц. Напряжение на анод тиратрона подавалось через цепь резонансной за-

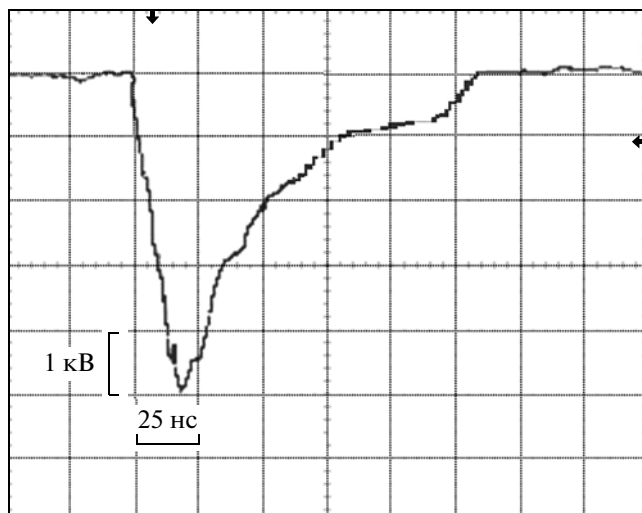


Рис. 2. Осциллограмма импульса напряжения на активной нагрузке 8 Ом при частоте следования импульсов 500 Гц.

рядки от высоковольтного выпрямителя, которая позволяла безопасно работать на частоте до 10 кГц.

Для тренировки тиратрона была использована активная нагрузка 8 Ом при напряжении на аноде тиратрона до 10 кВ (рис. 2). Во время тренировки были подобраны основные параметры схемы управления.

В этом режиме была получена длительность фронта импульса на уровне 15–20 нс при напряжении до 10 кВ. Следует отметить, что при увеличении напряжения длительность фронта уменьшается.

Отметим, что на тиратроне ТПИ3-10к/25 аналогичной конструкции, но меньшего размера была получена длительность коммутации на активной нагрузке 3–5 нс [8].

После цикла тренировки тиратрон был нагружен на ячейку газового лазера (рис. 3), аналогичную описанной в работе [1]. Эксперименты проводились с гелием и неонem при давлении около 15 Торр, а также при добавлении водорода с парциальным давлением <1 Торр. Длина активной части кюветы 50 см, диаметр 5 см, ускорительный зазор 1.5 мм, расчетная индуктивность 15 нГн. Обострительная емкость 12 нФ была смонтирована непосредственно на газоразрядной трубке таким образом, чтобы максимально снизить собственную индуктивность генератора электронного пучка. Заряд емкости осуществлялся от тиратрона через систему коаксиальных кабелей. Максимальный ток тиратрона при этом достигал 2.5 кА при напряжении на аноде 10 кВ. При этом ток пучка был равен 7 кА при длительности на полувысоте 23–25 нс. Датчики тока $I_{осц}$ и напряжения $U_{осц}$ были размещены так, как показано на рис. 3.

Типичные осциллограммы, характеризующие работу тиратрона и генератора пучка, приведены на рис. 4. Согласно рисунку, можно выделить 3 этапа работы генератора пучка. Первый этап – интервал времени t_1 , характеризующий заряд обострительной емкости от тиратрона. Ток тиратрона достигает здесь 2–2.5 кА и ограничен в основном импедансом цепи между тиратроном и обострителем и конструктивной индуктивностью этой цепи, кроме того возможна корректировка времени заряда обострительной емкости с помощью дополнительной индуктивности.

Интервал времени t_2 характеризует ток пучка. Ограничение тока пучка наступает вследствие неустойчивой работы генератора электронного пучка при возникновении импульса обратной полярности из-за рассогласования волнового сопротивления генератора пучка с омическим (сопротивление ускоряющего зазора). На ячейке аналогичной конструкции, но меньшего размера [3] и соответ-

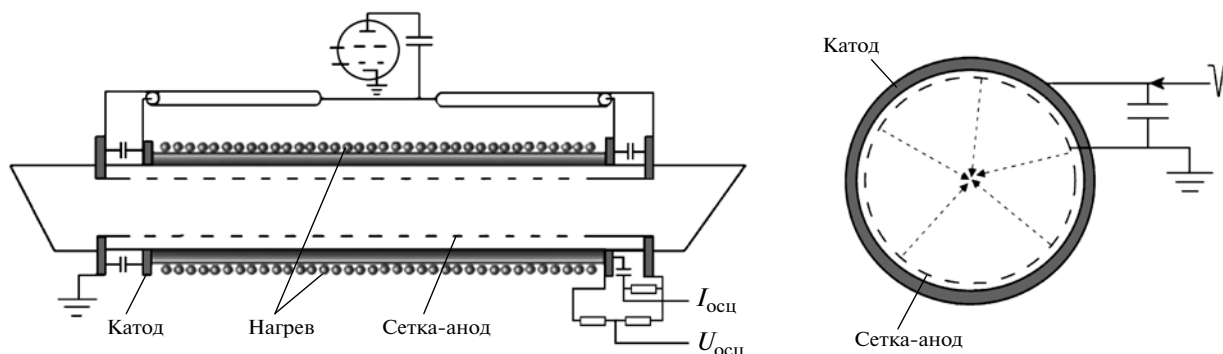


Рис. 3. Конструкция генератора пучка: слева – схематический вид ячейки газового лазера, справа – поперечный разрез газоразрядной трубки ячейки лазера (стрелками схематично показан электронный пучок).

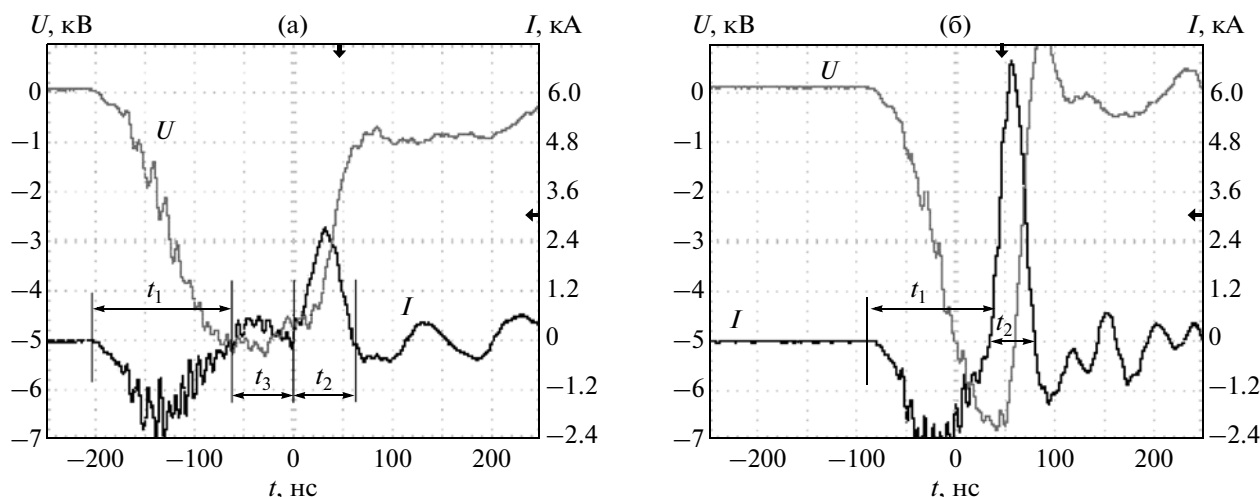


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения на разрядном промежутке при давлении рабочего газа Ne 4 Торр (а) и 6 Торр (б). Интервалы: t_1 – заряд обострительной емкости, ток тиратрона; t_2 – ток пучка; t_3 – задержка развития тока пучка.

ственно с меньшим импедансом был получен ток пучка до 27 кА.

Интервал t_3 характеризует задержку в развитии пучка и зависит от поданного напряжения, давления и состава газа, а также ряда других параметров [1].

Как видно из рис. 4а и 4б, оптимальный режим работы ячейки и, следовательно, максимальный ток в пучке обеспечиваются, когда пучок развивается без задержки, т.е. по достижении заданного напряжения на обострительной емкости начинает формироваться электронный пучок. Этот режим задается подбором оптимальных давления рабочего газа в ячейке и смеси газов, а также индуктивности в цепи зарядки обострительной емкости. Это особенно важно при работе с парами металлов, так как они кардинально меняют динамику развития пучка.

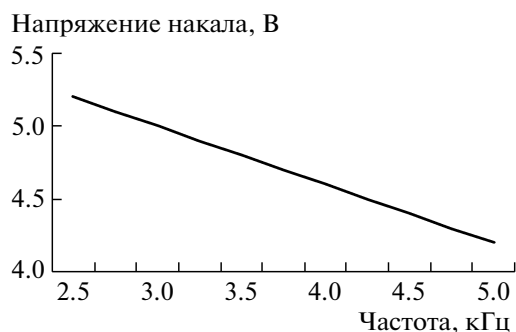


Рис. 5. Характерное изменение напряжения накала от частоты следования импульсов для условий описанного эксперимента.

Наиболее стабильно тиратрон работает в диапазоне 50–2500 Гц. При дальнейшем повышении частоты для обеспечения устойчивой работы тиратрона необходимо значительно снижать как энергию импульса предыонизации, так и напряжение накала генератора водорода. Однако в наибольшей степени стабильность работы тиратрона зависит от накала генератора водорода (рис. 5). По-видимому, это связано с неоптимальным расположением генератора водорода, который дополнительно нагревается во время прохождения импульса тока, либо от плазмы в катодной полости, создаваемой генератором предыонизации.

Тем не менее, энергетические характеристики импульсов на нагрузке заметно не меняются. Таким образом, можно предположить, что при дальнейшей модернизации схемы управления возможно достижение более высокой частоты следования импульсов. Вероятно, достижение еще более высокой частоты следования импульсов возможно и при модернизации генератора водорода и его лучшей изоляции от греющихся деталей конструкции тиратрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Действующий прототип модулятора для питания макета газового лазера имеет следующие выходные характеристики: амплитуда напряжения до 10 кВ, ток тиратрона до 2.5 кА, ток электронного пучка до 7 кА с длительностью на полувысоте 23–25 нс. Максимальная устойчивая частота повторения импульсов составила 5 кГц.

Автор выражает особую благодарность П.А. Бохану за постановку задачи, помощь в разработке ге-

нератора, подготовке материала, а также за ценные советы и замечания, Д.Э. Закревскому за помощь в отладке установки, Е.В. Бельской за деятельное участие в процессе постройки действующего прототипа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 11.519.11.6037) и РФФИ (грант 12-08-31141).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельская Е.В., Бохан П.А., Закревский Дм.Е. // Квантовая электроника. 2008. Т. 39. № 9. С. 823.
2. Bokhan P.A., Zakrevsky Dm.E. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 091502.
3. Bokhan P.A., Zakrevsky Dm.E., Gugin P.P. // Physics of Plasmas. 2011. V. 18. P. 103112.
4. Малашин М.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю. // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 127.
5. Рукин С.Н., Месяц Г.А., Словиковский Б.Г. и др. // In Proc. XIII IEEE Int. Pulsed Power Conf. Las Vegas, Nevada, USA, 2001. V. 2. P. 1272.
6. Bochkov V.D., Dyagilev V.M., Ushich V.G. et al. // Plasma Science. IEEE Transactions on. 2001. V. 29. № 5. P. 802.
7. Акимов А.В., Бак П.А., Корепанов А.А. и др. // Вестник НГУ. Серия: Физика. Т. 3. Вып. 4. С. 68.
8. Bokhan P.A., Zakrevskii Dm.E., Lavrukhin M.A. // Quantum Electronics. 2009. V. 39. № 10. P. 911.