

УДК 537.533.2

Ньен Чан Чжо, Е. П. Шешин, Зай Яр Лвин, Лвин Наинг Вин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Высоковольтный источник питания для автоэлектронной эмиссии источников света

Представлен способ генерации импульсов массового разряда мощностью до 200 нс до 40 кВ, работающих со скоростями повторения до 100 кГц, которые могут быть синхронизированы с лазерными импульсами. Эти материалы просты в изготовлении и были разработаны для генерации сверхбыстрого терагерцового импульса от GaAs-фотопроводящих антенн с использованием лазера с регенеративным усилением с высокой повторяемостью. Также показано улучшение отношения сигнал–шум в поле постоянного смещения постоянного тока и применение питания для генерации терагерцового импульса.

Ключевые слова: автоэмиссионные свойства материалов, автоэлектронные катоды, источники света, источник питания автоэлектронной эмиссии, автоэлектронные катоды.

Nyein Chan Kyaw, E. P. Sheshin, Zay Yar Lwin, Lwin Nainng Win

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

High voltage power source for field emission of light sources

We present a method of generating 200 ns high-voltage (up to 40 kV) pulses operating at repetition rates of up to 100 kHz, which can be synchronized with laser pulses. These supplies are simple to make and are developed for ultrafast terahertz pulse generation from GaAs photoconductive antennas using a high repetition rate regeneratively amplified laser. We also show an improvement in the signal-to-noise ratio over the continuous dc bias field and application of the supply to terahertz pulse generation.

Key words: autoemission properties of materials, field electron cathodes, light sources, source of power for field emission autoelectron cathodes.

1. Введение

Поскольку для автоэмиссионных приборов вообще и для источников света в частности необходимо довольно большое напряжение (5–30 кВ), но в то же время достаточно малой мощности (до нескольких десятков ватт), большинство перспективных источников питания основано на принципе высокочастотного импульсного преобразования [1].

Известно, что автоэлектронная эмиссия является наиболее экономичным видом эмиссии свободных электронов, что дает возможность создания новых поколений эффективных электронных приборов с повышенными техническими и потребительскими свойствами. Этому способствуют такие свойства автоэлектронной эмиссии, как отсутствие накала, высокая плотность тока, устойчивость к колебаниям температуры, безинерционность, экспоненциально высокая крутизна вольт-амперной характеристики, малая чувствительность к внешней радиации.

Суть явления автоэлектронной эмиссии состоит в туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер на поверхности твердого тела. Современные тенденции к экономии энергии и экологичности активно способствуют разработке электронных приборов с

автокатодами, которые, кроме того, приобретают дополнительные потребительские свойства. Особенно это касается автокатодов из углеродных материалов, способных работать в высоком техническом вакууме, достаточно легко достижимом в серийных электронных приборах. На нашей кафедре вакуумной электроники ведется достаточно широкий спектр работ как по новым углеродным материалам для автокатодов и их конструкциям, так и по разработке новых поколений электронных приборов [2].

Импульсные источники электромагнитного излучения в диапазоне терагерцовых частот имеют все возрастающие приложения, такие как визуализация, спектроскопия, исследования переноса заряда и другие фундаментальные исследования [1, 2]. Для получения высокой энергии или высоких средних терагерцовых импульсов, использование широкополосных фотопроводящих антенн всегда было предпочтительным. В таких фотопроводящих антеннах фемтосекундный лазерный импульс генерирует несущие в зоне проводимости, которые ускоряются внешним полем смещения, что приводит к скачке тока. Этот импульс тока будет производить электромагнитное излучение, которое в дальнем поле пропорционально временной производной тока [3]. Даже при флюенсе насыщения лазера излучаемое терагерцовое (около $50 \mu \text{ Дж/см}^2$ в полуизолирующем (SI) GaAs) излучаемое линейно скачивается с приложенным напряжением смещения постоянного тока [4]. Поэтому источники высокого напряжения обеспечивают более высокую эффективность и более высокую мощность терагерцовой генерации.

Лазерно-синхронизированные импульсные источники были использованы в прошлом для смещения фотопроводящих антенн на основе GaAs и других полупроводников и для выравнивания растворов диполярных молекул [5]. Однако верхний предел поля смещения может быть ограничен дугообразованием и коронарным разрядом или нагревом излучателя. Напряжение пробоя GaAs выше, чем у воздуха, и поэтому любая дуга приведет к деградации излучателя и введению электрического шума, приводящего к неисправности излучателя. Эти эффекты можно свести к минимуму, применяя импульсы напряжения как можно короче, поскольку мы знаем, что полевой пробой воздуха зависит от продолжительности электрического поля [6].

На работе [7] были рассмотрены преимущества различных видов смещения поля. Здесь мы опишем конструктивные и практические преимущества высоковольтного (40 кВ) 200 нс импульсного генератора с высокой средней мощностью, который может быть синхронизирован при частоте повторения до 100 кГц, подходящей для приложений с высокой частотой повторения (до 200 кГц) регенеративно усиленных лазеров.

2. Принципы и конструкция

Конструкция на основе трансформатора, показанная на рис. 1 и 2, была выбрана потому, что, хотя трансформаторы не способны генерировать самые короткие импульсы, они обеспечивают хорошую надежность, позволяют использовать относительно низковольтные полупроводники и позволяют последовательно подключать выходы к достижению более высоких напряжений.

Выходные трансформаторы T2/T3 управляются параллельно высокопотенциальным полупроводниковым полевым транзистором (MOSFET) FET1 (APT10025JVR) с током напряжением 1 000 В. В отсутствие триггера конденсаторы C3/C4 заряжаются через первичный трансформатор до напряжения внешнего источника постоянного тока. Когда принимается триггер, FET1 включается, и C3/C4 быстро разряжается через первичный, генерируя переходный процесс напряжения (рис. 3, вставка). Используется эта конфигурация, а не более общий «обратный преобразователь» [8], поскольку время включения FET1 обычно составляет 22 нс по сравнению с временем выключения 97 нс. Мощный МОП-транзистор, необходимый для высоких скоростей повторения, имеет высокую внутреннюю емкость затвора 15 нФ, а оставшаяся часть схемы оптимизирована для обеспечения высокого тока, необходимого для зарядки в течение этого короткого времени включения.

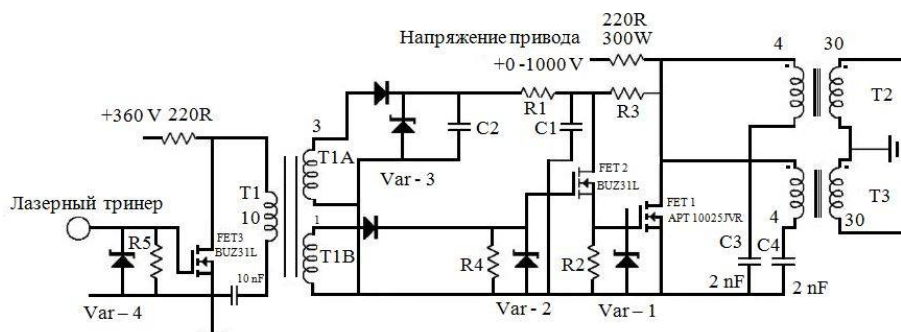


Рис. 1. Схема импульсного источника постоянного тока

Затвор управляется MOSFET FET2, который подключен в контуре с низкой индуктивностью вокруг резервуарного конденсатора $C1$ 40 nF ceramic и стока FET1. Напряжение затвора FET1 ограничено 10 В варистором Var-1 и R2 (15Ω , неиндуктивный). Триггерный вход от лазерного привода T1 через FET3 BUZ31L и компоненты защиты, R5 (1 k Ω), и Var-4. Выход T1A выпрямляется для обеспечения питания 12 В на $C2$ ($1 \mu F$) для FET2. Это уменьшает текущую потребность в высоковольтном постоянном токе, который поддерживает питание 12 В через R3, когда триггер не принимается. T1B генерирует высокочастотный привод для FET2, (ограниченный на 15 В Var-2), и в сочетании с T1A изолирует лазерную электронику от высоковольтных выходных переходных процессов. Время выключения полного переключателя определяется R4. Здесь значение 100 обеспечивает возможность переключения частоты повторения 100 кГц.

Выходные трансформаторы T2 и T3 симметрично соединены с землей для уменьшения пикового напряжения от плоскости заземления.

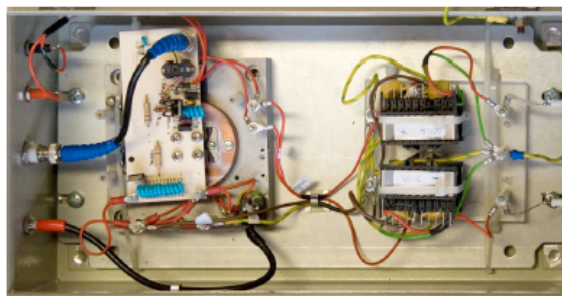


Рис. 2. Изображение импульсного источника питания постоянного тока. В левом нижнем углу находятся источники питания и триггерные соединения. В центре находится переключатель FET на медном радиаторе, а справа — трансформаторы с разъемами BNC для каждого трансформатора с общей симметрично соединенной землей

Импульс, показанный на рис. 3, является результатом затухания трансформатора, чтобы минимизировать импульс. Конденсаторы $C3 / C4$ управляют током в первичных элементах и настраиваются путем проб и ошибок, чтобы обеспечить лучший компромисс между выходным напряжением, звонком и неизбежным увеличением тока питания с повышенным демпфированием. Эксперименты проводились с использованием высоковольтного питания для генерации терагерцового импульса из фотопроводящей антенны. Антенна состояла из пластинки SI-GaAs $\langle 100 \rangle$ 3 см 2 . На рис. 2 показано изображение фактического питания, которое помещается в заземленный металлический ящик, чтобы дополнительно уменьшить любые эффекты помех. Регенерируемое усиление 200 кГц Ti: апфировая лазерная система производила 3μ Дж импульсов с центром в 800 нм с длительностью импульса 100 фс.

Пучок накачки (98 % мощности, коллимированный с диаметром пучка 6 мм) был отправлен через переменную ступень задержки до направления на антенну, симметрично заполняя площадь между электродами [11].

Это эффективно удваивает общее напряжение, возникающее при пробое трансформатора, и уменьшает радиочастотные помехи. Конструкция выходных трансформаторов является основным фактором в форме выходного импульса. Они были намотаны вручную на 3F3 ферритовых U-образцах с коэффициентом поворота 4 : 30 с использованием 28 SWG (0,375 мм²) изолированного провода. Эти относительно большие сердечники позволили использовать высоковольтный изолированный провод, увеличивая напряжение пробоя и уменьшая емкость перемотки. Кроме того, каждый слой был покрыт полиэтиленовой пленкой из поливинилхлорида (ПВХ). В противном случае трансформаторы были обычными со вторичной раной поверх первичного и вторичного крана высокого напряжения на самом внешнем слое. Было установлено, что коэффициент поворота 4 : 30 дает лучший компромисс между коэффициентом усиления напряжения и длительностью импульса.

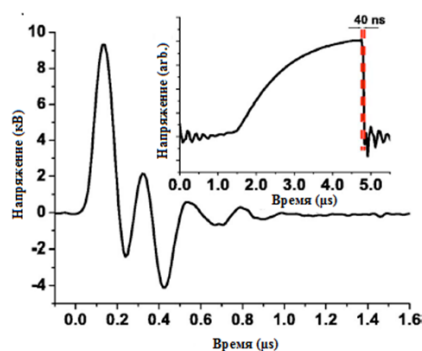


Рис. 3. Измеренный импульс выходного напряжения (от положительного выходного трансформатора) на частоте 100 кГц и (вставка) 40 нс времени переключения FET1

При использовании встроенного источника питания постоянного тока 1 кВ, работающего на частоте 100 кГц, импульсное питание способно создавать общее пиковое напряжение 20 кВ для напряжения привода 733 В при 0,4 А (этот ток является линейным по частоте повторения и пиковому напряжению). При более низкой частоте повторения (1 кГц) достижимо 40 кВ.

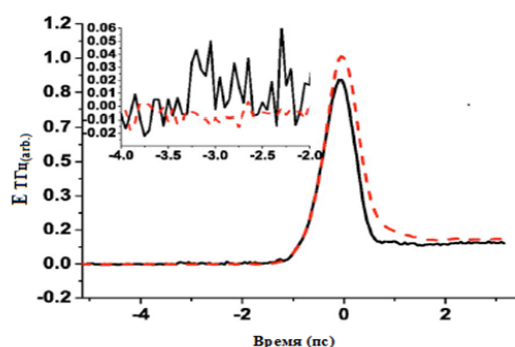


Рис. 4. Терагерцовый импульс от пластины GaAs с применением электрического поля 500 В для источника постоянного тока (сплошная) и импульсная подача (пунктирная) и (вставка) базовой линии от -4 до -2 пс, показывающей улучшенное отношение сигнал-шум

Испускаемое терагерцовое излучение было обнаружено на расстоянии 5 см путем электрооптического отбора образцов с использованием кристалла ZnTe толщиной 0,5 мм (110) в геометрии отражения, как описано ранее [2, 11]. Экспериментально было подтвержде-

но, что расстояние в 5 см между генератором и детектором обеспечивает сигнал дальнего поля [5]. Используется сбалансированное обнаружение, когда диоды подключены к встроенному усилителю Stanford SR810. Для экспериментов сравнения поля постоянного тока использовался источник питания Glassman EL03R15 500 В постоянного тока.

3. Результаты эксперимента

На рис. 4 сравнивается измеренное терагерцовое электромагнитное поле с импульсным источником питания постоянного тока при том же напряжении смещения. Характеристики терагерцового сигнала не изменяются с увеличением напряжения, а напряжение источника питания постоянного тока ограничивает сравнение эксперимента с максимальным напряжением 500 В. Основное преимущество здесь состоит в том, что, при вызове импульса напряжения на чередующихся лазерных импульсах, происходит «электронный измельчитель», что позволяет значительно увеличить частоту демодуляции блокировки, чем может быть достигнуто с помощью обычного оптического прерывателя. Улучшение отношения сигнал–шум, показанного на рис. 4 (вставка), измеренное как стандартное отклонение в базовой линии, имеет восьмикратное значение для частоты импульсов 100 кГц по сравнению с механической скоростью измельчителя 1,5 кГц. Без этого увеличения частоты SNR сигнала очень схож. Также на рис. 4 показана небольшая разница в форме импульса.

В заключение мы представляем относительно простой высоковольтный источник короткого импульса для синхронизации с лазерными импульсами при частоте повторения до 100 кГц. Его применение дает улучшение отношения сигнал–шум измеренного терагерцового сигнала по сравнению со стандартным источником постоянного тока. Эта конструкция является относительно недорогой и имеет то преимущество, что не требует внешнего охлаждения или радиатора и может с комфортом генерировать импульсы 40 кВ на частоте 1 кГц и с теплоотдачей может достигать 20 кВ при 100 кГц.

Литература

1. Качтиков В.Г., Никитин И.Е. Источники электропитания высокого напряжения РЭА. М.: Радио и связь, 1986. 200 с.
2. Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия и её использование // 59-я научная конференция МФТИ. 2017.
3. Beaurepaire E., Turner G.M., Harrel S.M., Beard M.C., Beard J.Y., Schmuttenmaer C.A. Coherent terahertz emission from ferromagnetic films excited by femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. 2004. V. 84.
4. Welsh G.H., Hunt N.T., Wynne K. Terahertz-pulse emission through laser excitation of surface plasmons in a metal grating // Physics Review Letters. 2007. V. 98.
5. Auston D.H., Cheung K.P., Smith P.R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles // Applied Physics Letters. 1984. V. 45. P. 284.
6. Budiarto E., Margolies J., Jeong S., Son J. High-intensity terahertz pulses at 1-kHz repetition rate // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1996. V. 32.
7. Wynne K., Carey J.J. An integrated description of terahertz generation through optical rectification, charge transfer, and current surge // Optics Communications. 2005. V. 256. P. 400.
8. Kachickas G.A., Fisher L.H. Formative Time Lags of Uniform Field Breakdown in N₂ // Physical Review Journals Archive. 1952. V. 88. P. 878.
9. Turton D.A., Welsh G.H., Carey J.J., Reid G.D., Wynne G.S.K. Alternating high-voltage biasing for terahertz large-area photoconductive emitters // Review of Scientific Instruments. 2006. V. 77.

10. *Giraud G., Rittener J., Chergui M., Mourik F.V.* High-voltage pulse generator for THz field generation // Review of Scientific Instruments. 2005. V. 76.
11. *Carey J.J., Bailey R.T., Pugh D., Sherwood J.N., Cruickshank F.R., Wynne K.* Terahertz pulse generation in an organic crystal by optical rectification and resonant excitation of molecular charge transfer // Applied Physics Letters. 2002. V. 81.
12. *Wu Q., Zhang X.C.* Free-space electro-optic sampling of terahertz beams // Applied Physics Letters. 1995. V. 67.
13. *Beard M.C., Turner G.M., Schmittenmaer C.A.* Measuring Intramolecular Charge Transfer via Coherent Generation of THz Radiation // Journal Of Physical Chemistry. 2002. V. 106. P. 878.

References

1. *Kachtikov V.G., Nikitin I.E.* High-voltage power supply sources REA. Radio and Communications. 1986. 200 p. (in Russian).
2. *Sheshin E.P.* Autoelectronic emission and its use. 59th MIPT Scientific Conference. 2017. (in Russian).
3. *Beaurepaire E., Turner G.M., Harrel S.M., Beard M.C., Beard J.Y., Schmittenmaer C.A.* Coherent terahertz emission from ferromagnetic films excited by femtosecond laser pulses. Applied Physics Letters. 2004. V. 84.
4. *Welsh G.H., Hunt N.T., Wynne K.* Terahertz-pulse emission through laser excitation of surface plasmons in a metal grating. Physics Review Letters. 2007. V. 98.
5. *Auston D.H., Cheung K.P., Smith P.R.* Picosecond photoconducting Hertzian dipoles. Applied Physics Letters. 1984. V. 45. P. 284.
6. *Budiarto E., Margolies J., Jeong S., Son J.* High-intensity terahertz pulses at 1-kHz repetition rate. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1996. V. 32.
7. *Wynne K., Carey J.J.* An integrated description of terahertz generation through optical rectification, charge transfer, and current surge. Optics Communications. 2005. V. 256. P. 400.
8. *Kachickas G.A., Fisher L.H.* Formative Time Lags of Uniform Field Breakdown in N₂. Physical Review Journals Archive. 1952. V. 88. P. 878.
9. *Turton D.A., Welsh G.H., Carey J.J., Reid G.D., Wynne G.S.K.* Alternating high-voltage biasing for terahertz large-area photoconductive emitters. Review of Scientific Instruments. 2006. V. 77.
10. *Giraud G., Rittener J., Chergui M., Mourik F.V.* High-voltage pulse generator for THz field generation. Review of Scientific Instruments. 2005. V. 76.
11. *Carey J.J., Bailey R.T., Pugh D., Sherwood J.N., Cruickshank F.R., Wynne K.* Terahertz pulse generation in an organic crystal by optical rectification and resonant excitation of molecular charge transfer. Applied Physics Letters. 2002. V. 81.
12. *Wu Q., Zhang X.C.* Free-space electro-optic sampling of terahertz beams. Applied Physics Letters. 1995. V. 67.
13. *Beard M.C., Turner G.M., Schmittenmaer C.A.* Measuring Intramolecular Charge Transfer via Coherent Generation of THz Radiation. Journal Of Physical Chemistry. 2002. V. 106. P. 878.