

УСТРОЙСТВО НАНОСЕКУНДНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЩНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2020 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. А. Тоскин^б, Ю. В. Аристов^а, Д. А. Коротков^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

^б АО «НПО «Поиск»

Россия, 188662, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, пос. Мурино, ул. Лесная, 3

*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 31.05.2019 г.

После доработки 03.06.2019 г.

Принята к публикации 05.06.2019 г.

Рассмотрено высокостабильное и высокоэффективное электровзрывное устройство инициирования мощных ударных волн, содержащее электродетонатор на основе узкой медной фольги, покрытой полимерной пленкой, и полупроводниковый генератор субмикросекундных импульсов тока, обеспечивающих электрический взрыв фольги за время ~ 70 нс. Показана возможность использования разработанного устройства для подрыва взрывчатых веществ, обладающих высокой устойчивостью к тепловым и механическим внешним воздействиям.

DOI: 10.31857/S0032816219060090

В настоящее время мощные ударные волны применяются при штамповке и сварке крупногабаритных изделий, в горном деле, для устранения ледовых заторов, а также в физических исследованиях, направленных на создание сверхсильных магнитных полей и сверхвысоких давлений. Для формирования ударных волн широко используются взрывчатые вещества (в.в.), обладающие высокой устойчивостью к экстремальным механическим и тепловым внешним воздействиям.

Они инициируются электровзрывными детонаторами, в которых под воздействием мощного и короткого (субмикросекундного) импульса электрического тока осуществляется быстрый электрический взрыв тонкого проводника. В результате формируются тепловой импульс и мощная ударная волна, вызывающие подрыв в.в. При малой длительности и достаточно большой мощности электровзрывного воздействия достигается высокая стабильность моментов подрыва в.в., требуемая, например, для создания многоточечного взрыва в научных исследованиях при формировании ударных волн с заданной конфигурацией.

Основной проблемой при разработке электровзрывного детонатора является обеспечение эффективной коммутации мощных субмикросекундных импульсов тока, которая осуществляется искровыми разрядниками или традиционными полупроводниковыми приборами (тиристорами или транзисторами). Фундаментальным недо-

статком этих коммутаторов являются сравнительно большие потери энергии при наносекундной длительности процесса коммутации, обусловленные недостаточным малым временем переключения в хорошо проводящее состояние, составляющим десятки и сотни наносекунд.

Более перспективными представляются разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе кремниевые динисторы с наносекундным временем переключения [1–3], которое формируется в результате ударной ионизации решетки кремния.

На рис. 1 приведена электрическая схема разработанного устройства. Оно состоит из электровзрывного детонатора ЭД и генератора мощных субмикросекундных импульсов.

Генератор содержит цепь управления ЦУ и силовую цепь СЦ. Цепь управления выполнена на основе IGBT-транзисторов по схеме в работе [4]. Малые коммутационные потери энергии в транзисторах достигаются в результате использования рекомендаций в [5]. Силовая цепь состоит из коммутатора в виде описанного в [6] динистора с ударной ионизацией SID (SID – shock-ionized dynistor), конденсатора С, шунтирующих диодов D и блока дрейфовых диодов с резким восстановлением DSRD (DSRD – drift step recovery diodes) [7]. В качестве SID используется динистор с рабочим напряжением 3 кВ. Он изготовлен из кремниевой пластины толщиной ~ 0.7 мм и имеет рабочую площадь ~ 1 см². Блок DSRD состоит из 8 напаян-

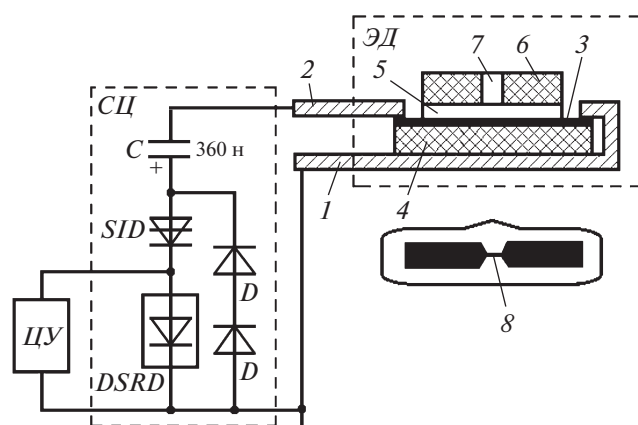


Рис. 1. Электрическая схема устройства наносекундного инициирования в.в. *СЦ* – силовая цепь, *ЦУ* – цепь управления, *SID* – диностор с ударной ионизацией, *DSRD* – блок из 8 последовательно соединенных дрейфовых диодов с резким восстановлением, *D* – шунтирующие диоды, *ЭД* – электродетонатор; 1, 2 – выходные шины; 3 – медная фольга; 4 – керамическая подложка; 5 – полимерная пленка; 6 – прижимная пластина; 7 – канал для вывода продуктов взрыва; 8 – взрывающийся участок фольги.

ных друг на друга диодных структур толщиной ~ 0.3 мм и рабочей площадью ~ 1 см². Шунтирующие диоды *D* выполнены из кремниевых пластин $\varnothing 12$ и толщиной ~ 0.35 мм.

Детонатор *ЭД* выполнен аналогично рассмотренному в [8]. Тонкая (~ 4 мкм) медная фольга 3 расположена на керамической подложке 4 и покрыта полимерной пленкой 5 толщиной ~ 30 мкм, на которую наложена пластина 6. В центре пластины 6 расположен канал 7 в виде отверстия диаметром ~ 0.8 мм. Находящийся под каналом 7 участок фольги 3 выполнен в виде микропроводника 8 длиной 0.7 и шириной 0.5 мм. Иницируемое в.в. располагалось над каналом 7.

В схеме на рис. 1 в исходном состоянии к *SID* приложено напряжение зарядки емкостного накопителя *C*. Включение *SID* осуществляется с помощью цепи управления *ЦУ* и блока *DSRD*. При включении *ЦУ* через блок *DSRD* пропускается короткий прямой ток, обеспечивающий накопление заряда в структурах диодов. В момент окончания прямого тока *ЦУ* коммутирует в блок *DSRD* быстро нарастающий обратный ток. При этом осуществляется вынос накопленного заряда и выключение *DSRD* за время ~ 3 нс. В процессе выключения *DSRD* протекающий через *ЦУ* ток коммутруется в цепь *D–D–SID*. В результате обеспечивается зарядка собственной емкости *SID* со скоростью > 1 кВ/нс, и напряженность поля вблизи коллектора его полупроводниковой структуры резко возрастает.

Поскольку до момента переключения в приколлекторной области *SID* нет свободных носи-

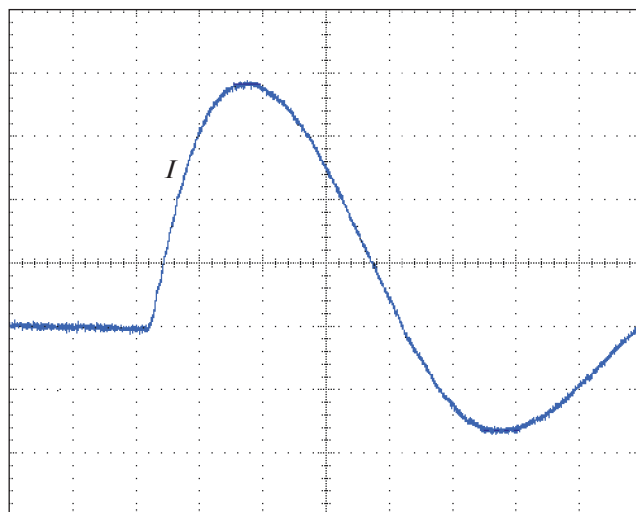


Рис. 2. Осциллограмма силового тока. Масштаб по вертикали 1.5 кА/деление, по горизонтали – 100 нс/деление.

телей, способных инициировать лавинный пробой, то напряжение на диносторе нарастает до величины, существенно превышающей предельно допустимое в стационарном состоянии. Спустя 2–3 нс до приколлекторной области *SID* долетают носители, инжектируемые из эмиттеров в момент наброса напряжения. Они инициируют волну ударной ионизации решетки кремния, которая осуществляет включение *SID* за время < 1 нс. При этом конденсатор *C* разряжается по цепи *SID–DSRD*–шина 1–фольга 3–шина 2.

При пропускании через фольгу 3 мощного быстро нарастающего тока происходит электрический взрыв микропроводника 8. Подложка 4 обеспечивает движение продуктов взрыва (плазмы) к каналу 7. Высокоскоростной поток плазмы воздействует на пленку 5 и разгоняет ее в канале 7 в направлении к в.в. При ударе пленки 5 о поверхность в.в. формируется мощная ударная волна, вызывающая детонацию в.в.

Для определения коммутационных возможностей силовой цепи *СЦ* было проведено ее исследование без использования *ЭД*. Коммутируемый ток измерялся коаксиальным шунтом с сопротивлением 50 мОм, подключенным к выходным шинам 1, 2. При максимально возможном силовом напряжении 3 кВ была осуществлена коммутация тока с амплитудой ~ 6 кА и длительностью ~ 400 нс, что свидетельствует о высоких коммутационных возможностях *SID* и о малом электрическом сопротивлении *СЦ* (~ 0.5 Ом). Малая монтажная индуктивность *СЦ* (~ 40 нГн) обеспечила скорость нарастания силового тока ~ 70 А/нс.

На рис. 2 приведена осциллограмма силового тока $I = 5.7$ кА, полученная при силовом напряжении 2.8 кВ. В этом режиме было проведено

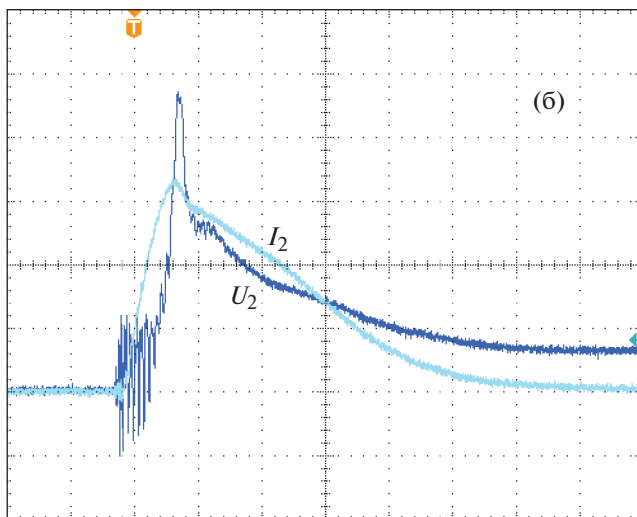
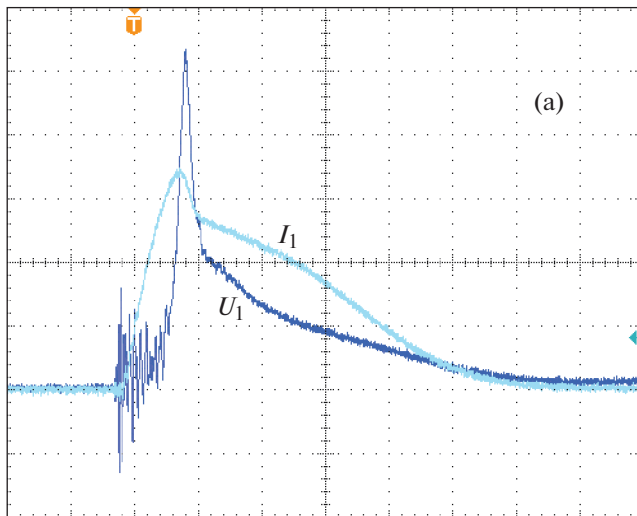


Рис. 3. Осциллограммы тока через ЭД и напряжения на ЭД при силовом напряжении 2.4 кВ (а) и 2.7 кВ (б). Масштаб по вертикали: тока 1 кА/деление, напряжения 500 В/деление; по горизонтали — 100 нс/деление.

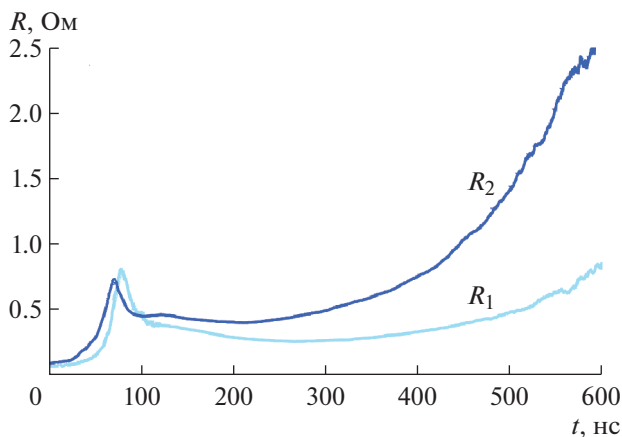


Рис. 4. Сопротивление ЭД при силовом напряжении 2.4 кВ (R_1) и 2.7 кВ (R_2).

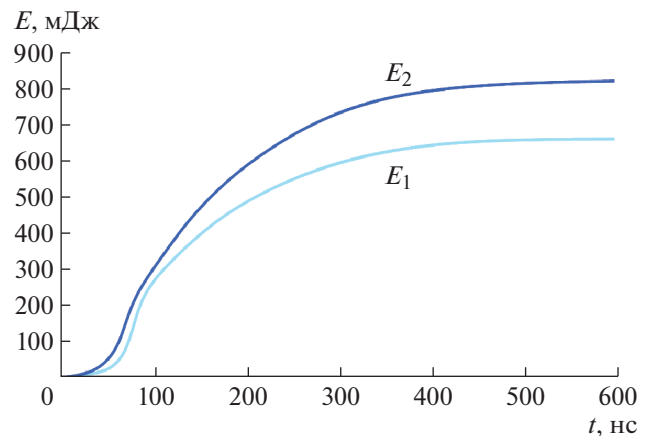


Рис. 5. Энергия, вводимая в ЭД при силовом напряжении 2.4 кВ (E_1) и 2.7 кВ (E_2).

1000 коммутаций без изменения выходных характеристик *СЦ*. Разброс амплитуд тока I составлял <5%. Временная нестабильность коммутируемых импульсов тока не превышала 5 нс.

На рис. 3а, 3б приведены типичные осциллограммы тока через ЭД (I_1 , I_2) и напряжения на ЭД (U_1 , U_2), полученные при исследовании опытных образцов детонаторов без использования в.в. при силовом напряжении 2.4 и 2.7 кВ.

На рис. 4 показаны расчетные кривые, иллюстрирующие изменение электрического сопротивления исследуемых ЭД (R_1 , R_2) в процессе протекания токов I_1 , I_2 .

Из рис. 3 и 4 видно, что спустя ~50 нс после коммутации в детонатор импульса тока его сопротивление резко возрастает до 0.7–0.8 Ом, а затем быстро спадает до ~0.4 Ом. При этом на детонаторе возникает пик напряжения с амплитудой >2 кВ и длительностью ~70 нс, соответствующий первой фазе электрического взрыва фольги [9]. Затем сопротивление ЭД плавно увеличивается из-за расширения плазменной области. В результате ток через ЭД уменьшается. Так как после взрыва фольги сопротивление детонатора близко к сопротивлению силовой цепи *СЦ*, то процесс передачи энергии из *СЦ* в ЭД происходит достаточно эффективно.

На рис. 5 представлены временные диаграммы энергии (E_1 , E_2), выделяемой в исследуемых детонаторах при силовом напряжении 2.4 и 2.7 кВ, откуда следует, что в детонаторы вводится ~60% энергии, исходя запасаемой в емкостном накопителе силовой цепи.

Рассмотренное устройство инициирования мощных ударных волн было использовано для подрыва высоконадежного в.в. HNS-IV, используемого в промышленных технологиях. Образцы в.в. имели массу 120 мг, их инициирование осу-

шествлялось при силовом напряжении от 2.4 до 3 кВ с шагом 500 В. При напряжении свыше 2.7 кВ был получен 100% подрыв в.в.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что разработанное устройство обладает высокой эффективностью и стабильностью срабатывания. При силовом напряжении более 2.7 кВ оно обеспечивает формирование мощной детонационной волны, необходимой для надежного подрыва взрывчатого вещества типа HNS-IV, обладающего высокой устойчивостью к экстремальным внешним воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Efanov V., Kardo-Sysoev F., Tchashnicov I., Yarin P.* // Proc. of the 22nd Int. Power Modulator Symp. Boca Raton. Fl. 1996. P. 247.
2. *Grekhov I.V., Korotkov S.V., Rodin P.B.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. № 2. Part 1. P. 378.
3. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2014. № 4. С. 67. <https://doi.org/10.7868/S0032816214040065>
4. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Жмодиков А.Л., Коротков Д.А., Люблинский А.Г.* // ПТЭ. 2009. № 5. С. 90.
5. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Жмодиков А.Л., Козлов А.К., Коротков Д.А.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 42. <https://doi.org/10.7868/S0032816218010202>
6. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Воронков В.Б.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0032816219010130>
7. *Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Susoev A.F., Shenderoy S.V.* // Solid State Electronics. 1985. V. 28. № 4. P. 597.
8. *Davies H.R., Chapman D.J., Vine T.A., Proud W.G.* // AIP conference proceedings. 2009. P. 283.
9. *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990.