

УДК 621.382

А. А. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Измерение динамических параметров дрейфовых диодов с резким восстановлением

Представлено описание работы быстродействующих размыкателей тока – дрейфовых диодов с резким восстановлением напряжения (ДДРВ). Предлагаемая схема для исследования динамики электронно-дырочной плазмы в ДДРВ позволяет определять амплитудно-временные параметры импульсов, формируемых на нагрузке одиночными диодными структурами и собранных в диодную сборку. Отличается своей простотой и универсальностью по отношению к типам исследуемых ДДРВ.

Дрейфовый диод с резким восстановлением, электронно-дырочная плазма, наносекундные импульсы напряжения, ток накачки

Необходимость формирования импульсов нано- и субнаносекундной длительности вызвана современными потребностями экспериментальной физики, преобразовательной и локационной техники, импульсной интроскопии, релятивистской СВЧ-электроники, системами питания лазеров и ускорителей и т. п. Перспективным методом формирования высоковольтных нано- и субнаносекундных импульсов является использование дрейфовых диодов с резким восстановлением запирающих свойств (ДДРВ) в качестве коммутатора размыкающего типа [1]. Важнейшими характеристиками полупроводникового диода, предназначенного для работы в качестве быстродействующего размыкателя тока, являются скорость его переключения и максимальное блокируемое напряжение. Подтвержденная экспериментально скорость переключения кремниевых ДДРВ составляет $dU/dt \sim 10^3$ В/нс на одном $p-n$ -переходе. В последние годы получены первые результаты экспериментального исследования работы ДДРВ в динамическом режиме на основе арсенида галлия [2] и карбида кремния [3], которые показали возможность переключения дрейфовых диодов со скоростью $dU/dt \sim 2 \cdot 10^3$ и $4 \cdot 10^3$ В/нс соответственно.

Динамические параметры ДДРВ измеряются в типичном для дрейфовых диодов режиме импульсного питания прямым и обратным токами в составе широко используемой двухконтурной схемы, в которой импульсы накачки и выкачки синхронизированы по времени запуска [4], [5]. При срабатывании ключа первого контура (K_1) через диод начинает протекать ток – происходит

процесс «накачки» диода неравновесной электронно-дырочной плазмой высокой плотности (рис. 1). За время, равное половине периода колебаний первого LC -контура, ток проходит через максимум и спадает до нуля (запасая при этом в диоде неравновесный заряд инжектированных носителей) и замыкается ключ второго контура (K_2), подключая ДДРВ к источнику обратного смещения – заряженному конденсатору C_2 . Накачанный плотной плазмой диод имеет сопротивление значительно меньше, чем сопротивление нагрузки, поэтому практически весь ток, определяемый вторым контуром, протекает через диод до момента полного истощения плазмы. В момент, когда происходит полное истощение плазмы, диод резко восстанавливается, и ток, протекающий во втором контуре, перебрасывается из ДДРВ в подключенную параллельно нагрузку, формируя на ней выходной импульс напряжения.

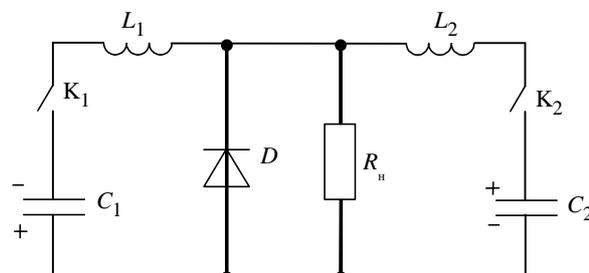


Рис. 1

Для эффективной работы ДДРВ необходимо добиться такого согласования параметров импульсов прямого и обратного токов с параметрами диода, при котором границы плазменных об-

ластей встречаются в плоскостях $p-n$ -перехода [6]. Только выполнение этого условия может обеспечить сохранение квазинейтральности базы в течение всей длительности второй стадии и сопротивление ДДРВ (а значит, и потери в нем) будет минимально возможным. Указанное условие для прямого и обратного токов влечет за собой необходимость синхронизации срабатывания ключей первого и второго контуров с субнаносекундной точностью. Кроме того, являясь элементом резонансного контура, ДДРВ влияет на его резонансную частоту, что влечет за собой необходимость подбора времени срабатывания второго ключа для каждого типа диодной структуры.

В данной статье предлагается схема исследования динамики электронно-дырочной плазмы ДДРВ, которая лишена описанных недостатков двухконтурной схемы и позволяет измерять амплитудно-временные параметры ДДРВ, отличающихся площадью рабочей области (а значит, и плотностью обрываемого тока) и количеством диодных структур, соединенных последовательно.

Экспериментальные результаты. Схема характеристики ДДРВ представляет собой устройство формирования импульсов напряжения на испытуемых диодных структурах (рис. 2). В первоначальном состоянии конденсаторы C_3 , C_4 заряжены до напряжения источника питания ($U_{пит}$). При подаче импульса запуска от внешнего генератора происходит замыкание транзисторных ключей S_1 , S_2 , конденсаторы C_3 , C_4 частично разряжаются и осуществляется накачка ДДРВ (диода D_1) прямым током. На второй стадии ключи S_1 , S_2 размыкаются и в цепи происходит перезарядка с периодом колебаний, определяемым индуктивностями L_4 , L_5 и емкостями C_1 , C_2 . При достижении максимального тока происходит восстановление обратного сопротивления диода и энергия, накопленная в L_4 , L_5 , переходит в нагрузку $R_{нагр}$, на которой формируется высоковольтный импульс напряжения. Для регулировки внесенного в ДДРВ заряда (степени его накачки электронно-дырочной плазмой) на этапе протекания прямого тока предусмотрен источник постоянного напряжения $U_{нак}$.

В качестве ключей S_1 , S_2 используются полевые n -канальные высоковольтные транзисторы с временем срабатывания менее 5 нс, максимальным напряжением сток-исток 1000 В и отдаваемым импульсным током 140 А. Для обеспечения необходимых токов накачки и рассасывания возможно использование нескольких одинаковых

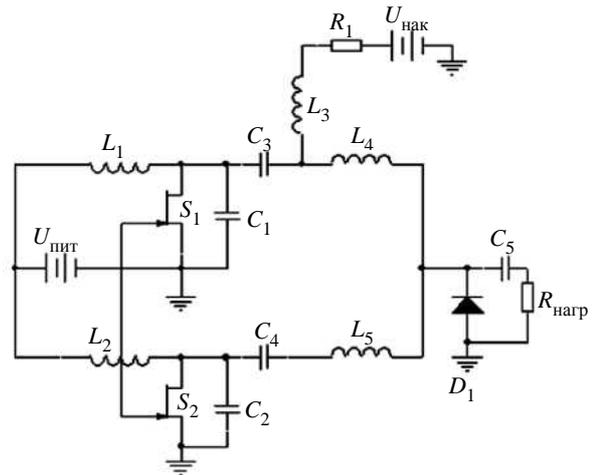


Рис. 2

каналов формирователей импульсов, работающих на один ДДРВ.

Для определения максимального тока накачки, обеспечиваемого схемой, вместо диодного образца в держатель ставился безындуктивный шунт 0.1 Ом, позволяющий измерять ток индуктивностей L_4 , L_5 . На рис. 3 показана осциллограмма стадий накачки диода электронно-дырочной плазмой и ее рассасывания. Результаты измерений положительного (рассасывание) и отрицательного (накачка) пиков токов позволяют оценить максимальный ток ресурс схемы. Ток накачки, измеренный на шунте 0.1 Ом, составил 20 А.

Исследования амплитудных и временных параметров выходных импульсов проводились с использованием высокочастотного стробоскопического осциллографа «Tektronix DSA8300» с полосой пропускания 20 ГГц. В качестве пятидесятиомной нагрузки использовалась батарея высоковольтных широкополосных аттенуаторов «Barth Electronics» с суммарным коэффициентом передачи 86 дБ. Для

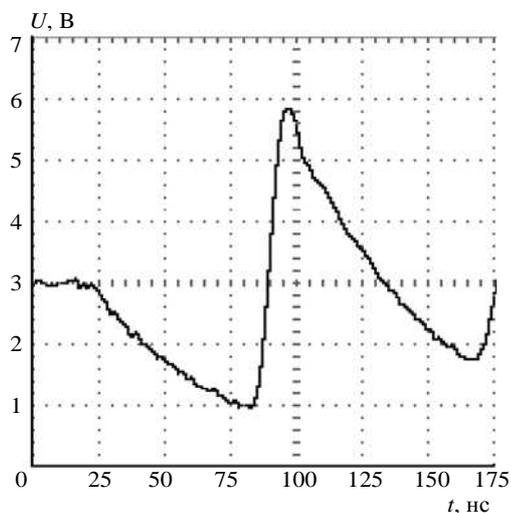


Рис. 3

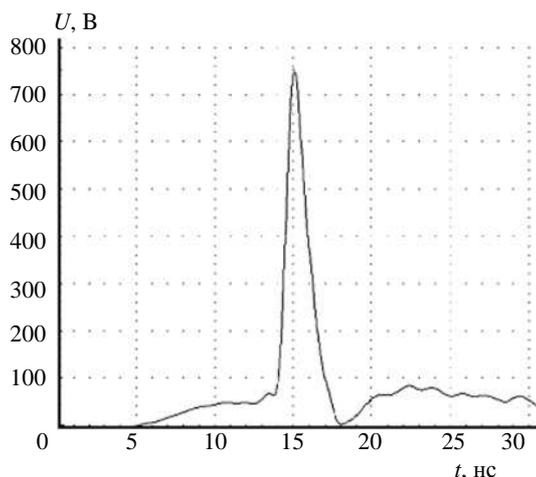


Рис. 4

достижения оптимальной величины вносимого заряда на этапе накачки ДДРВ электронно-дырочной плазмой проводилась регулировка напряжения смещения источника ($U_{\text{нак}}$) по амплитуде импульса, формируемого на нагрузке. Подстройка напряжения смещения позволяет найти максимум импульса при его регистрации на осциллографе, что соответствует оптимальному режиму работы ДДРВ, когда полный заряд, перенесенный через диод обратным током, соответствует полному заряду, перенесенному прямым током.

На рис. 4 и 5 в качестве иллюстрации работы схемы показаны осциллограммы напряжения на нагрузке 50 Ом, формируемые одиночным кремниевым ДДРВ и сборкой, состоящей из двух последовательно включенных Si-ДДРВ, соответственно.

Амплитуда импульса, изображенного на рис. 4, составляет 760 В, длительность на полу-

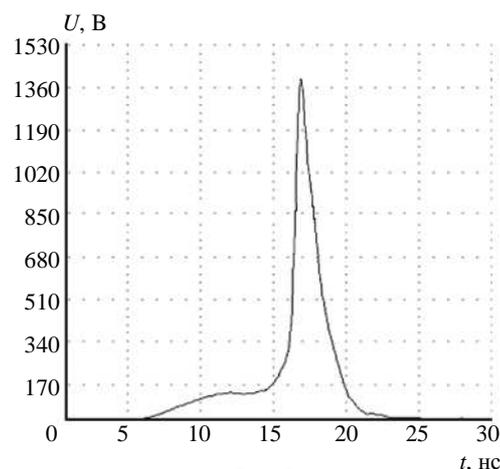


Рис. 5

ширине 1.6 нс. Амплитуда импульса на рис. 5 равна 1390 В, а длительность переднего фронта – 600 пс. Таким образом, описываемая измерительная схема позволяет регистрировать субнаносекундные времена переключения дрейфовых диодов с резким восстановлением.

Описанная измерительная схема для исследования динамики электронно-дырочной плазмы дрейфовых диодов с резким восстановлением позволяет определять плотность обрываемого тока ДДРВ, скорость его переключения, а также амплитудно-временные параметры субнаносекундных импульсов напряжения, формируемых на пятидесятиомной нагрузке как отдельными диодными структурами, так и диодными сборками, состоящими из последовательно включенных ДДРВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения / И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардосысов, С. В. Шендерей // Письма в ЖТФ. 1983. № 9 (7). С. 435–439.
2. Рожков А. В., Козлов В. А. Пикосекундные высоковольтные дрейфовые диоды на арсениде галлия // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37, № 12. С. 1477–1479.
3. Афанасьев А. В., Иванов Б. В., Ильин В. А. Дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе карбида кремния // Сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб., 2012. С. 260–262.
4. Иванов П. А., Грехов И. В. Высоковольтные дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе 4H-SiC: теоретическая оценка предельных параметров // Журн. техн. физики. 2015. Т. 85, вып. 6. С. 111–117.
5. О возможности создания диода со сверхрезким восстановлением запирающих свойств на основе карбида кремния / И. В. Грехов, П. А. Иванов, А. О. Константинов, Т. П. Самсонова // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 13. С. 24–29.
6. Грехов И. В. Генерация мощных наносекундных импульсов с помощью полупроводниковых размыкателей тока // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 2000. № 1. С. 53–61.

A. A. Smirnov

Saint Petersburg state electrotechnical university «LETI»

MEASUREMENT OF DYNAMIC PARAMETERS OF DRIFT STEP RECOVERY DIODES

The description of the operation of high-speed current breakers – drift recovery diodes voltage (DSRDs) is presented. The proposed scheme for the study of the dynamics of the electron-hole plasma in DSRDs allows to determine the amplitude and timing of the pulses generated by the load as a single diode structure, and collected diode assembly. Distinguished by its simplicity and flexibility in relation to the types of study DSRDs.

Drift step recovery diode, nanosecond pulses, pump current, electron-hole plasma

УДК 47.09.29: 31.15.35

К. А. Беспалова, А. О. Белорус

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Л. В. Шайдаров, А. В. Третьяков

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Исследование влияния технологических параметров на морфологию поверхности пористого кремния

Рассмотрены свойства пористого кремния применительно к биомедицине, получение порошков пористого кремния методом электрохимического анодного травления, а также влияние технологических параметров этого процесса на морфологию получаемых частиц.

Пористые наноматериалы, пористый кремний, нанопорошки, биомедицина, электрохимическое травление, локальная доставка лекарств

Пористый кремний (ПК) находит применение в таких областях, как микро- и оптоэлектроника, фотоника, сенсорика, альтернативная энергетика, наноэлектроника и многих других, благодаря ряду свойств: фотолюминесценции, большой удельной площади поверхности и, как следствие, высокой химической активности, хорошим антиотражающим свойствам, значительно развитой морфологии поверхности и т. д. [1]. В статье рассматриваются порошки, полученные из слоев пористого кремния, для биомедицинских применений. Выбор данного материала связан с такими его важными свойствами, как биосовместимость, биodeградируемость, простота технологии получения и др. [2]–[7]. Наночастицы ПК могут быть применены для инженерии тканей, визуализации опухолей, лечения глазных заболеваний, разработки биодатчиков,

биомаркеров и фотосенсибилизаторов [8], [9]. Порошки ПК также применимы для адресной доставки лекарств – метода, при котором вещества транспортируются напрямую в заданную область организма, выбранную клетку или орган. Частицы ПК могут быть использованы в качестве нагружаемого лекарством контейнера – переносчика, поверхность которого, в свою очередь, покрывается так называемым вектором – веществом, распознающим место доставки. Главными задачами контейнера являются: доставка вещества до больной клетки, высвобождение лекарства и выведение из организма, без побочных действий. Любые параметры порошка, такие как его масса, размеры частиц, из которых он состоит, и их пористость, влияют на количество доставляемого вещества, объем вектора, а также время, затрачиваемое на выво-