

УДК 621.396.6. 029.055 (075)

Д. ф.-м. н. Е. Н. КАЛАБУХОВА<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. В. В. ОЛЕЙНИК<sup>2</sup>,  
к. ф.-м. н. Д. В. САВЧЕНКО<sup>1</sup>, А. А. СИТНИКОВ<sup>1</sup>, А. В. ЦВИР<sup>3</sup>, М. Г. ИЩЕНКО<sup>3</sup>

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАНУ;  
<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко; <sup>3</sup>НИИ «Орион»

E-mail: katia@i.kiev.ua

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МОСТ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХА 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*Предлагается конструкция когерентного импульсного микроволнового моста с выходной мощностью до 10 Вт с временным разрешением  $10^{-8}$  с при частоте повторения импульсов 1 кГц, предназначенного для спектрометров электронного спинового эха. Мост построен по гомодинной схеме на основе кремниевых лавинно-пролетных диодов, которые используются для модуляции и усиления СВЧ-мощности, поступающей от опорного генератора на диоде Ганна. Преимуществами моста являются оптимальная мощность и минимальная длительность импульсов, простота в управлении, а также низкая стоимость.*

*Ключевые слова: мощный твердотельный импульсный микроволновый мост, спектрометр электронного спинового эха, двухкаскадный когерентный импульсный усилитель на ЛПД.*

С развитием нанотехнологий методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) приобретают особое значение при определении симметрии, концентрации, структуры парамагнитных атомов и молекул, динамики их поведения, а также пространственного распределения в решетке. Однако эти возможности методов ЭПР не могут быть полностью реализованы при использовании традиционных спектрометров ЭПР, работающих в постоянном микроволновом поле (непрерывный режим). С этой точки зрения спектрометры ЭПР, работающие в импульсном режиме, так называемые спектрометры электронного спинового эха (ЭСЭ), имеют преимущества как по чувствительности, так и по спектральной и временной разрешающей способности. В частности, повышение спектральной разрешающей способности спектрометра ЭСЭ достигается за счет разделения перекрывающихся спектров ЭПР от парамагнитных центров, имеющих различное время спиновой релаксации.

Однако, несмотря на перспективность и высокую информативность, спектрометры ЭСЭ остаются практически недоступными для большинства лабораторий в мире, что связано с отсутствием технологий производства необходимых микроволновых компонентов и их высокой стоимостью. Развитие в последнее десятилетие новых технологий создания микроволновых генераторов, усилителей и других микроволновых

компонентов изменило ситуацию и инициировало разработку импульсных спектрометров ЭПР [1–4]. Фирмой Bruker Instrument (Германия) уже серийно выпускаются импульсные спектрометры с рабочей частотой 9, 35 и 95 ГГц [4].

В импульсной технике ЭПР широко применяемыми являются спектрометры ЭПР X-диапазона частот, где фирмой Bruker Instrument разработаны комбинированные спектрометры ЭПР серии ESP 380/580, позволяющие проводить эксперименты как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Разработан также спектрометр серии E 600/680 с рабочей частотой 95 ГГц (W-диапазон частот) и мощностью СВЧ-импульсов до 100 мВт. В то же время разработке импульсных спектрометров ЭПР в промежуточном Q-диапазоне частот (8-мм диапазон частот) до сих пор уделяется мало внимания.

Целью настоящей работы была разработка мощного когерентного импульсного микроволнового моста с временным разрешением  $10^{-8}$  с, предназначенного для спектрометров ЭСЭ с рабочей частотой 35 ГГц и позволяющего измерять время спиновой релаксации, спектры ЭСЭ в условиях развертки магнитного поля, спектры модуляционного спада сигнала ЭСЭ с двух-, трех- и четырехимпульсной последовательностью [6, 7]. При этом мост должен отличаться простотой в управлении, низкой стоимостью и малым энергопотреблением.

### Общая характеристика микроволновых импульсных мостов, предназначенных для спектрометров ЭСЭ

Микроволновой мост, который является неотъемлемой частью спектрометров ЭПР, состоит из передающего и приемного модулей, предназ-

Работа выполнялась в рамках партнерского УНТЦ проекта P236 (2006–2008 гг.) и государственной целевой научно-технологической программы «Разработка и создание сенсорных наукоемких продуктов» (2008–2012 гг.).

наченных для генерации и детектирования СВЧ-мощности в микроволновом тракте спектрометра ЭПР. Принцип действия микроволнового моста основан на генерации серии кратковременных микроволновых импульсов, энергия которых поглощается парамагнитным веществом в условиях ЭПР, и регистрации отклика спиновой системы вещества на импульсное возбуждение. Этот сигнал имеет название сигнала ЭСЭ, который является ответом электронной спиновой системы на импульсное СВЧ-возбуждение. При измерении спектров ЭПР в передающем модуле микроволнового моста генерируется СВЧ-сигнал, который подается на резонатор спектрометра ЭПР с исследуемым образцом, а затем сигнал, отраженный от рабочего резонатора, детектируется и усиливается в приемном модуле микроволнового моста.

Диапазон СВЧ-мощности, которая генерируется в передающем модуле микроволнового моста, отличается для импульсного и непрерывного возбуждения. При измерении сигналов ЭПР в условиях непрерывного СВЧ-возбуждения, мощность должна быть невысокой, не больше чем 100–200 мВт. При измерениях сигналов ЭПР в условиях импульсного СВЧ-возбуждения, мощность в импульсе должна быть высокой, а импульсы короткими, что связано с временем релаксации парамагнитных центров. Для регистрации спектров ЭСЭ от парамагнитных центров с малым временем спин-решеточной релаксации  $T_1$  (порядка  $10^{-7}$  с) требуются очень короткие мощные СВЧ-импульсы.

В [8, с. 83] было показано, что из соотношения между длительностью  $\tau$ , частотой  $f$  и мощностью  $P$  СВЧ-импульсов следует, что одно и то же значение  $\tau$  можно получить при различных значениях СВЧ-мощности в зависимости от рабочей частоты спектрометра. Так, например, при частоте 9 ГГц, соответствующей X-диапазону частот, длительность импульсов от 100 до 20 нс можно достичь при значениях  $P$  от 1 до 10 кВт. В то же время, при частоте 35–37 ГГц, соответствующей Q-диапазону частот, импульсы такой же длительности можно получить при СВЧ-мощности от 1 до 100 Вт в зависимости от добротности резонатора. Кроме того, с повышением частоты можно достичь меньшей длительности импульса. Так, при  $f = 35$  ГГц и при  $P = 1$  Вт можно получить минимальное значение  $\tau$  порядка 47 нс, в то время как при  $P = 18$  Вт длительность импульса может достигать 13 нс при добротности ненагруженного резонатора  $Q = 1000$  [1].

#### Передающий модуль импульсного моста

Известно, что основной характеристикой, которая определяет уровень качества спектрометра ЭПР, является его чувствительность. Чувствительность спектрометра ЭСЭ определяется его импульсными характеристиками, в частности его временным разрешением. Так, например, при временном разрешении  $10^{-7}$  с, чувствительность

когерентного спектрометра X-диапазона частот может достигать  $10^{11}$  спинов в образце [8, с. 86]. Поэтому главной проблемой при создании спектрометров ЭСЭ остается выбор конструкции микроволнового моста, в частности конструкции передающего модуля, в котором формируются СВЧ-импульсы.

Основными узлами передающего модуля импульсного микроволнового моста являются опорный генератор, работающий в непрерывном режиме, амплитудный модулятор и усилитель СВЧ-мощности. Амплитудный модулятор формирует из СВЧ-колебаний опорного генератора импульсы, которые затем поступают на усилитель. Функции модулятора и усилителя могут быть соединены в одном устройстве. Таким устройством является, например, электровакуумный усилитель на лампе бегущей волны, который используется при построении импульсного моста в спектрометрах фирмы Bruker Instrument.

Однако лампам бегущей волны присущи такие недостатки как ограниченный ресурс работы (от 500 до 1500 часов), высокий уровень шумов, необходимость юстировки и настройки в процессе эксплуатации, ухудшение технических характеристик под воздействием магнитных полей, большое энергопотребление и высокая цена. Поэтому в настоящей работе для усиления СВЧ-импульсов, поступающих от опорного генератора на диоде Ганна, использованы кремниевые лавинно-пролетные диоды (ЛПД). При этом функции модулятора и усилителя СВЧ остаются отдельными: для амплитудной модуляции используются  $p-i-n$ -диоды, а усиление импульсов осуществляется с помощью двухкаскадного импульсного усилителя на основе ЛПД [9, 10].

Твердотельный полупроводниковый усилитель на основе ЛПД имеет большой гарантийный ресурс работы (не менее 10000 часов), небольшой на протяжении всего срока эксплуатации уровень шумов, а также низкую стоимость. Кроме того, в процессе эксплуатации ЛПД не требуют юстировки и подстройки аппаратуры, также они не подвержены влиянию магнитных полей. Модули СВЧ питаются от одного стабилизированного источника питания со значительно меньшим энергопотреблением, чем при использовании лампы бегущей волны.

На рис. 1 приведена структурная схема передающего модуля, обеспечивающую мощность в импульсе до 20 Вт при временном разрешении  $10^{-8}$  с.

Двухкаскадный импульсный усилитель имеет коэффициент усиления 25–27 дБ, что дает возможность при входной мощности усилителя 30–40 мВт обеспечить усиление сигнала на его выходе до 20 Вт. При этом длительность фронта импульсов составляет 5 нс, стабильность фазы около  $5^\circ$  при  $\tau = 100$  нс. Мощность в импульсе до 20 Вт достигается благодаря оптимизации параметров ЛПД и конструкции их камер. Стабильность фазы приблизительно в  $5^\circ$  при  $\tau = 100$  нс

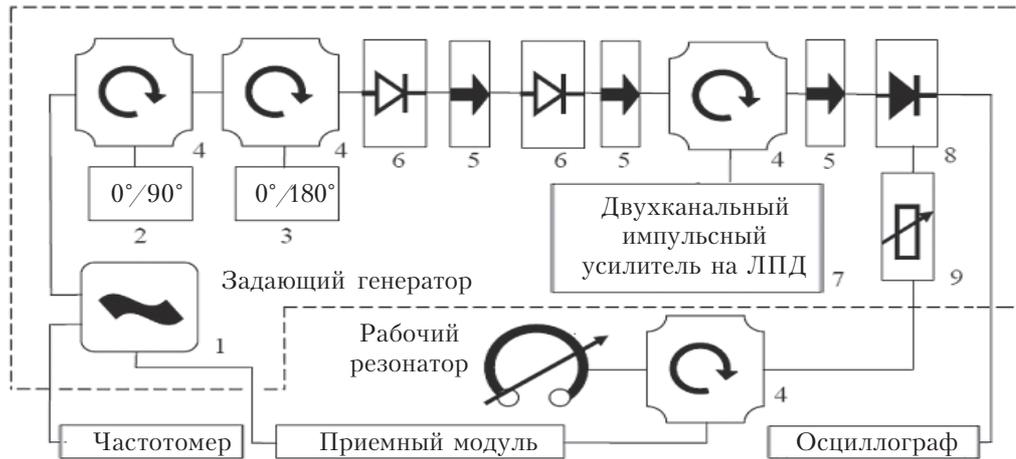


Рис. 1. Структурная схема передающего модуля импульсного микроволнового моста Q-диапазона частот: 1 – опорный генератор на диоде Ганна; 2, 3 – фазовращатели; 4 – циркуляторы; 5 – направленные ответвители; 6 –  $p-i-n$ -модуляторы; 7 – двухкаскадный импульсный усилитель; 8 – амплитудный детектор; 9 – аттенуатор

достигается с помощью специальной формы импульсного тока, протекающего через ЛПД, что обеспечивает компенсацию отклонения их частоты из-за нагревания  $p-n$ -перехода (его температура изменяется пропорционально корню квадратному из длительности импульса) [9]. Подавление СВЧ-мощности в промежутке между импульсами обеспечивается двумя секциями  $p-i-n$ -модуляторов. Уровень подавления опорного сигнала между импульсами СВЧ для одного  $p-i-n$ -модулятора составляет порядка 60 дБ, что является недостаточным. Использование двухсекци-

онного  $p-i-n$ -модулятора обеспечивает подавление в паузе до уровня около 110 дБ.

Число, длительность и частота повторений импульсов задаются формирователем импульсов с программным обеспечением. Выбор частоты повторений пачек импульсов определяется временем спин-спиновой релаксации парамагнитного центра, и оптимальное ее значение находится в диапазоне от 100 Гц до 1 кГц. Выходная мощность импульсного усилителя контролируется с помощью амплитудного детектора, расположенного на выходе усилителя. Регулировка

*Технические характеристики передающего модуля импульсного микроволнового моста, предназначенного для спектрометров ЭСЭ Q-диапазона частот*

Технические характеристики	Параметры
Рабочая частота	34,6–35,4 ГГц
Мощность в импульсе	20 Вт
Рабочий режим	Последовательность пачек импульсов
Длительность импульсов выходного сигнала	20–300 нс
Количество импульсов в пачке	1–3
Минимальная задержка между импульсами	100 нс
Скважность в пределах пачки импульсов	2–10000
Частота повторения пачек импульсов	100 Гц – 1 кГц
Длительность фронта и среза импульса выходного сигнала	не более 5 нс
Паразитное отклонение задержки между импульсами выходного сигнала	не более 3 нс
Нестабильность импульсной выходной мощности в пределах одной пачки импульсов	не более 10%
Паразитное отклонение частоты в пределах импульса	не более 1 МГц.
Уровень непрерывной мощности на выходе в паузе между импульсами	не более –110 дБ
Отклонение фазы в пределах импульса и между импульсами	не более 5° для $\tau=100$ нс не более 15° для $\tau=300$ нс
СВЧ-мощность опорного плеча	10 мВт
Потери в волноводном тракте до резонатора	не более 3 дБ

выходной мощности передающего модуля осуществляется с помощью размещенного на выходе импульсного усилителя аттенюатора, имеющего глубину модуляции 40 дБ. Технические характеристики передающего модуля приведены в таблице.

**Приемный модуль импульсного моста**

Описанная конструкция передающего модуля с возможностью циклического изменения фазы сигналов действующих импульсов позволяет использовать в приемном модуле моста двухканальную фазочувствительную схему детектирования сигнала ЭСЭ, так называемое квадратурное детектирование сигналов ЭСЭ.

В коммерческих спектрометрах ЭПР, как правило, используется фазочувствительное детектирование сигналов, которое предполагает использование когерентного СВЧ-источника. В этом случае мощность от задающего генератора разделяется на две части: одна служит сигналом, запускающим передающий модуль, вторая подается в опорное плечо к балансному смесителю, что и обеспечивает когерентное детектирование сигналов ЭПР. При этом может быть использована гомодинная или супергетеродинная схема приема сигнала ЭПР.

Гомодинная схема предполагает одинаковые частоты опорного и информационного сигналов. На выходе получается видеосигнал, который в силу своей малости подвержен вредному воздействию низкочастотных шумов со спектром типа  $1/f$ .

В гетеродинной (или супергетеродинной) схеме приема используются два генератора микроволновой частоты – сигнальный генератор (SO) и гетеродин (LO). Достоинством метода является то, что основное усиление можно осуществить на сравнительно низкой промежуточной частоте, что проще и дешевле. Для создания сигнала с частотой LO используется часть мощности сигнального генератора SO, смешанной с сигналом генератора промежуточной частоты. Частота SO служит для возбуждения исследуемого образца. Отраженный от резонатора сигнал с частотой SO смешивается с сигналом частотой LO, образуется сигнал с промежуточной частотой, который усиливается и используется для выделения полезного сигнала ЭПР. При гетеродинном приеме усиление сигнала ЭПР осуществляется на промежуточной частоте, которая существенно выше, чем те, на которых необходимо учитывать действие низкочастотных шумов со спектром типа  $1/f$ . Основными недостатками гетеродинного моста по сравнению с гомодинным являются более высокая цена, большее число элементов, относительная сложность формирования частот.

Схема микроволнового моста с гетеродинным приемом является более подходящей для высокочастотных спектрометров ЭПР – рабочая частота здесь выше 50 ГГц, когда трудно достигнуть уровня необходимой выходной мощности на основной частоте [11]. В коммерческих спектрометрах ЭПР обычно используется гомодинная схема. Это становится возможным благодаря появлению интегральных малошумящих усилителей, которые позволяют обеспечить высокий уровень чувствительности приемного модуля без использования супергетеродинной схемы усиления.

Исключением является выпускаемый Bruker Instrument спектрометр ELEXSYS E580 с временным разрешением  $10^{-8}$  с, в котором используется супергетеродинная схема микроволнового моста [4, 8]. Такая схема позволяет построить комбинированный спектрометр ЭПР, который может работать на частоте 9 и 35 ГГц. При этом на частоте 35 ГГц в приемном модуле гетеродинного типа частота 9 ГГц выбрана как промежуточная.

Таким образом, гомодинная схема усиления сигнала ЭСЭ для приемного модуля импульсного

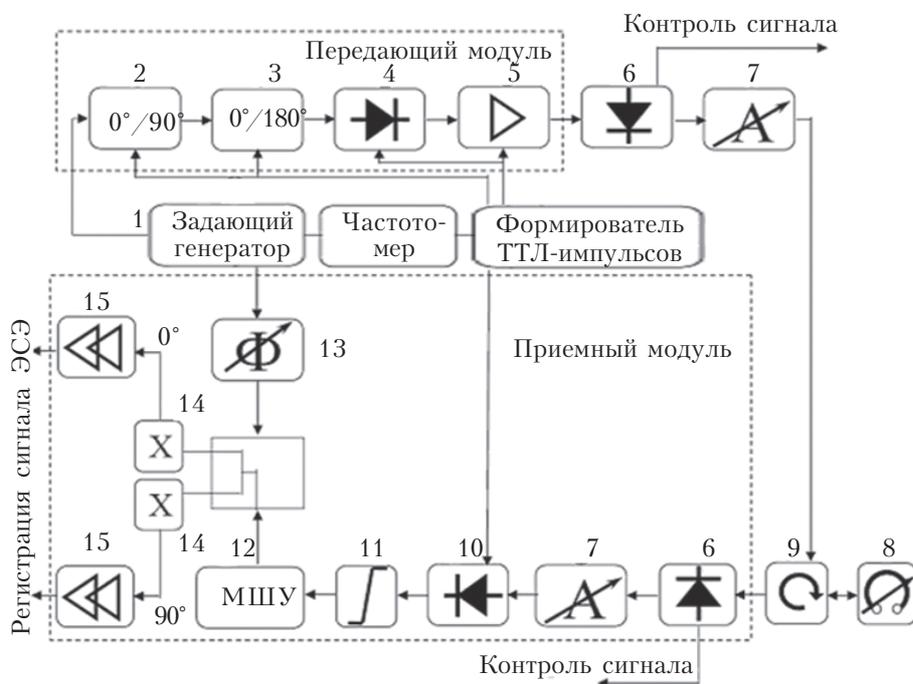


Рис. 2. Структурная схема импульсного микроволнового моста Q-диапазона частот:

- 1 – задающий генератор; 2, 3 – фазовращатели; 4 – p-i-n-модуляторы; 5 – двухкаскадный импульсный усилитель; 6 – амплитудные детекторы; 7 – аттенюаторы; 8 – резонатор; 9 – циркулятор; 10, 11 – защитное устройство; 12 – МШУ; 13 – фазовращатель; 14 – ортомодовые балансные смесители; 15 – видеоусилители

микроволнового моста с рабочей частотой 35 ГГц является оптимальной, т. к. она может обеспечить высокий уровень чувствительности спектрометра и его надежности при небольшом количестве элементов и сравнительно низкой стоимости.

На рис. 2 представлена структурная схема импульсного моста, построенного по гомодинной схеме. Приемный модуль состоит из амплитудного детектора; аттенюатора; малощумящего усилителя, защищенного от импульсных сигналов ограничителем и ключом на  $p-i-n$ -диоде, работа которых контролируется ТГЛ-импульсами; синхронного детектора и двухканального видеоусилителя. Амплитудный детектор предназначен для контроля сигналов, отраженных от резонатора. С помощью аттенюатора регулируется мощность сигналов на выходе из резонатора. Синхронный детектор состоит из двух ортомодовых балансных смесителей, активным элементом которых являются диоды с барьером Шоттки.

Таким образом, двухканальная система детектирования регулируется с помощью двух балансных смесителей, между опорными колебаниями которых имеется фазовый сдвиг  $90^\circ$ , а информационные колебания (с выхода резонатора) синфазны — так называемое квадратурное детектирование. В результате два сигнала на выходе синхронного детектора содержат информацию о фазе исходного сигнала, отраженного от резонатора.

С помощью изменения фаз действующих импульсов можно проводить селекцию полезных сигналов ЭСЭ, т. к. они «отслеживают» фазу импульсов и складываются в памяти компьютера, а паразитные сигналы не зависят от фазы импульса и, взаимно уничтожаясь в конце фазового цикла, не проявляются в результирующем спектре ЭСЭ.

#### Принцип работы моста

В соответствии с рис. 2, работа импульсного когерентного микроволнового моста, предназначенного для импульсных спектрометров ЭСЭ, осуществляется следующим образом. Выходная мощность опорного генератора (100 мВт) разделяется на две части — одна запускает передающий модуль, а вторая служит для питания двух балансных смесителей приемного модуля моста, что обеспечивает когерентное детектирование сигнала ЭСЭ. В качестве опорного источника использовался диод Ганна с механической перестройкой частоты, который в отличие от генератора с электронной перестройкой частоты не имеет фазовых сдвигов и характеризуется более низкими спектральными шумами [12]. Для контроля частоты опорного генератора небольшая часть микроволновой мощности опорного генератора (1–2 мВт) отводится к частотомеру.

Мощность, которая поступает на передающий модуль, проходит через два дискретных фазовращателя и через два амплитудных  $p-i-n$ -модулятора подается на мощный двухкаскадный импульсный усилитель.

Количество, длительность и частота повторения импульсов задается формирователем импульсов. Сформированные импульсы большой мощности поступают через циркулятор на резонатор. Микроволновая мощность, отраженная от резонатора поступает в приемный модуль, где с помощью синхронного детектора осуществляется квадратурное детектирование сигналов ЭСЭ. Сигнал ЭСЭ и опорный сигнал смешиваются и преобразуются в видеосигнал, который усиливается двухканальным видеоусилителем и направляется к интегратору с узкополосным фильтром.

В качестве синхронного детектора использован смеситель типа XM1001 фирмы Mimix Broadband, имеющий потери на преобразование 8 дБ. На сигнальный вход смесителя поступает мощность, отраженная от резонатора, а на гетеродинный вход — сигнал от опорного генератора Ганна. В цепи сигнала от опорного генератора установлен фазовращатель, с помощью которого можно механически регулировать фазу опорного сигнала. Таким образом, на выходе получаются две квадратурные компоненты протектированного сигнала.

Улучшение собственного соотношения сигнал/шум достигается за счет использования в схеме моста МШУ типа АММС-6241 фирмы Agilent, коэффициент усиления которого составляет 21 дБ.

Двухканальный видеоусилитель построен на основе операционных усилителей типа AD 8011. На входе двух каналов видеоусилителя установлены аттенюаторы, позволяющие регулировать амплитуду сигналов в пределах  $\pm 3$  дБ. Коэффициент передачи видеоусилителя составляет +36...+39 дБ в полосе пропускания 82 МГц.

#### Заключение

Таким образом, разработана конструкция когерентного импульсного микроволнового моста  $Q$ -диапазона частот, который имеет выходную мощность до 10 Вт, минимальную длительность импульсов до 20 нс при частоте их повторения 1 кГц.

По сравнению с импульсным мостом, разработанным фирмой Bruker Instrument, предлагаемый мост проще в управлении и имеет более высокую выходную мощность, низкую стоимость, меньший и стабильный уровень шумов, больший ресурс работы, малую величину энергопотребления, но более ограниченный круг методик, который может быть осуществлен с его помощью.

Импульсный спектрометр ЭСЭ, оснащенный разработанным мостом, позволит проводить эксперименты по измерению времени спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, спектров ЭСЭ в условиях развертки магнитного поля, а также спектров модуляционного спада сигнала ЭСЭ с использованием двух-, трех- и четырехимпульсной последовательности с преобразованием Фурье.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Davoust C.E., Doan P.E., Hoffman B. M. Q-band Pulsed Electron Spin-Echo Spectrometer and Its Application to ENDOR and ESEEM // J. Magn. Reson. — 1996. — Ser. A 119, N 0049. — P. 38—44.
2. Gromov I., Shane J., Forrer J. et al. A Q-band pulse EPR/RNDOR spectrometer and the implementation of advanced one- and two-dimensional pulse EPR methodology // J. Magn. Reson. — 2001. — Vol. 149. — P. 196—203. — DOI:10.1006/jmre.2001.2298
3. Tkach I., Baldansuren A., Kalabukhova E. et al. A home-built ESE-spectrometer based on a high power Q-band microwave bridge // Appl. Magn. Reson. — 2008. — Vol. 35. — P. 95—112. — DOI: 10.1007/s00723-008-0141-5
4. ELEXSYS Spectrometer Series, BRUKER, <http://www.bruker.de>
5. Пат. 58891 України. Передавальний модуль мікрохвильового мосту для імпульсного когерентного спектрометра ЕПР 8 мм діапазону довжин хвиль / К. М. Калабухова, О. О. Сітніков А. В. Цвір та ін.— Бюл. “Промислова власність”. — 2011.— № 8. [Pat. 58891 Ukraini. / K. M. Kalabukhova, O. O. Sitnikov A. V. Tsvir ta in. Byul. “Promislova Vlasnist”. 2011. N 8]
6. Пат. 67160 України. Приймальний модуль твердотільного мікрохвильового мосту для імпульсного когерентного спектрометра електронного парамагнітного резонансу 8 міліметрового діапазону довжин хвиль / К.М. Калабухова, О.О. Сітніков А.В. Цвір та ін. — Бюл. “Промислова власність”. — 2012. — № 3. [Pat. 67160 Ukraini. / K.M. Kalabukhova, O.O. Sitnikov A.V. Tsvir ta in. Byul. “Promislova Vlasnist”. 2012. N 3]
7. Салихов К. М., Семенов А. Г., Цветков Ю. Д. Электронное спиновое эхо и его применение. — Новосибирск: Наука, 1976. [Salikhov K. M., Semenov A. G., Tsvetkov Yu. D. Elektronnoe spinovoe ekho i ego primenenie. Novosibirsk: Nauka, 1976]
8. Hofer P., Heilig R., Maier D. C. et al. “The super Q-FT Accessory”, Bruker BioSpin GmbH, EPR Division; Реклама FT-EPR Spectrometer E 580, ELEXSYS, Bruker.
9. Касаткин Л. В. Твердотельные импульсные генераторы на лавино-пролетных диодах миллиметрового диапазона длин волн // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. — 1998. — № 2. — С. 41—47. [Kasatkin L. V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. SVCh-tehnika. 1998. N 2. P. 41]
10. Іщенко М.Г., Касаткін Л.В., Тарасюк В.М. і др. Імпульсний когерентний напівпровідниковий генератор для спектрометра електронного спинового еха міліметрового діапазону волн // Радиоелектроника.— 2000.— № 8.— С. 50—55. [Ishchenko M.G., Kasatkin L.V., Tarasyuk V.M. i dr. // Radioelektronika. 2000. N 8. P. 50]
11. Чміль В. М., Сундучков К. С., Сундучков І. К. Техніка і технологія систем міліметрових волн // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. — 2003. — № 4. — С. 6—14 [Chmil' V. M., Sunduchkov K. S., Sunduchkov I. K. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2003. N 4. P. 6]
12. Иванов В. Н., Ковтонуик В. М., Раевская Н. С. Разработка конструкции и технологии изготовления диодов Ганна для КВЧ терапии // Интегральные схемы полупроводниковые приборы. — 2004. — № 3. — С. 55—57. [Ivanov V. N.,

Kovtonyuk V. M., Raevskaya N. S. // Integral'nye skhemy poluprovodnikovye pribory. 2004. N 3. P. 55]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 13.08 2012 г.

Kalabukhova E. N., Oleinik V. V., Savchenko D. V., Sitnikov A. A., Tsvir A. V., Ishchenko M.G. **Solid-state pulsed microwave bridge for electron spin echo spectrometers of 8-mm wavelength range.**

*Keywords: power solid-state pulsed microwave bridge, electron spin echo spectrometer, two-stage coherent pulsed amplifier based on IMPATT diodes.*

The article presents a construction of a coherent pulsed microwave bridge with an output power up to 10 Wt with a time resolution of  $10^{-8}$  seconds at a pulse repetition rate of 1 kHz designed for electron spin echo spectrometers. The bridge is built on a homodyne scheme based on IMPATT diodes, which are used for modulation and amplification of microwave power coming from the reference Gunn diode oscillator. The advantages of the bridge are optimal power and minimum pulse width, simple operation, low cost.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU; Taras Shevchenko National University of Kyiv; RI «Orion».

Калабухова К. М., Олійник В. В., Савченко Д. В., Сітніков О. О., Цвір А. В., Іщенко М. Г. **Твердотільний імпульсний мікрохвильовий міст для спектрометрів електронного спинового еха 8-мм діапазону довжин хвиль.**

*Ключові слова: потужний твердотільний імпульсний мікрохвильовий міст, спектрометр електронного спинового еха, двокаскадний когерентний імпульсний підсилювач на ЛПД.*

Пропонується конструкція когерентного імпульсного мікрохвильового мосту з вихідною потужністю до 10 Вт з часовим розділенням  $10^{-8}$  с при частоті повторення імпульсів 1 кГц, призначеного для спектрометрів електронного спинового еха. Міст побудовано за гомодінною схемою на основі кремнієвих лавинно-пролітних діодів, які використовуються для модуляції і підсилення НВЧ-потужності, що надходить від опорного генератора на діоді Ганна. Перевагою моста є оптимальна потужність і мінімальна тривалість імпульсів, простота в управлінні, низька вартість.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, НДІ «Оріон».