

# Ключ миллиметрового диапазона длин волн на основе фотопроводящего элемента для волноводов, встроенных в диэлектрическую подложку (SIW)

Е.А. Шепелёва, М.Н. Макурин, А.Ю. Никишов, А.С. Лукьянов, Г.А. Евтюшкин

ООО Исследовательский центр Самсунг, г. Москва, e.shepeleva@samsung.com

**Аннотация** — В данной статье описывается метод переключения волноводов миллиметрового диапазона длин волн, встроенных в диэлектрическую подложку (Substrate Integrated Waveguide (SIW)). В качестве ключа предложен фотопроводящий элемент, управляемый источником света ИК-диапазона. Преимуществом такого подхода является отсутствие гальванического контакта со схемой управления и питания, которые для существующих ключей миллиметрового диапазона (PIN-диодов, MEMS-элементов, FET-ключей) являются ограничивающим фактором из-за увеличения вносимых потерь, габаритных размеров и сужения рабочей полосы устройства. Предложенный фотопроводящий ключ (ФК) решает данные проблемы, так как система управления электрически разнесена с высокочастотным (ВЧ) трактом, а схема согласования может быть реализована непосредственно в волноводном тракте. Это уменьшает вносимые потери ключа, а сам метод является универсальным вплоть до ТГц частот и ограничивается лишь возможностями изготовления печатных плат.

В статье приводятся расчетные данные и результаты эксперимента для SIW-ключа, работающего на частоте 28ГГц. Достигнутый уровень изоляции составляет >15дБ, вносимые потери <0.5дБ.

**Ключевые слова** — Фотопроводящий ключ, СВЧ, КВЧ, встроенный в подложку волновод, SIW.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время технологии миллиметрового диапазона длин волн получают все большее развитие не только для военного применения, но и для новых приложений гражданского и коммерческого назначения. Близость внедрения нового стандарта связи 5G, предполагаемого к работе на частотах 26.5-29.5ГГц и 37-40ГГц [1], разработка навигационных устройств для беспилотных автомобилей для 24ГГц и 77ГГц [2], внедрение систем WiGig, стандартизированного для 60ГГц [3] и других, приводит к необходимости решения задач и проблем, присущих данному диапазону частот. При этом к разрабатываемым решениям предъявляются дополнительные требования по минимизации их стоимости, энергопотреблению, компактности. Все это заставляет искать новых подходов для осуществления стандартных устройств и их систем.

В данной статье мы обратимся к вопросу реализации ключей миллиметрового диапазона длин волн, реализованных в печатных платах на базе волноводов, встроенных в диэлектрическую подложку, или, так называемых, Substrate integrated waveguides (SIW). При разработке систем миллиметрового диапазона данный тип передающей линии может оказаться наиболее подходящим [4] благодаря следующему ряду преимуществ: возможность интегрирования в планарной форме классических волноводных компонентов; абсолютная экранированность от внешних наводок; более высокие пропускные мощности по сравнению с микрополосковыми линиями и копланарными волноводами; простота реализации на стандартных технологиях изготовления печатных плат при низкой чувствительности к точности изготовления. Также в многослойных конструкциях SIW-линии легко комбинируются с печатными антеннами и управляющими чипами (RF IC).

Широкое внедрение таких SIW-линий в данный момент ограничивается сложностью осуществления на их основе базовых управляющих компонентов, таких как фазовращатели, коммутаторы, аттенюаторы. Действительно, классические механические подходы [5] реализации данных элементов в волноводах не возможны для реализации в печатных платах, а электрические методы, основанные на использовании, например, р-і-п диодов [6], требуют их внедрения в сам волновод, что в случае волноводов на печатных платах также крайне затруднительно. В работе [7] предложен способ переключения SIW-линий при размещении р-і-п диодов на поверхности платы, однако их коммутация сложна, а элементы схемы смещения находятся в прямом пересечении с высокочастотным трактом устройства, что приводит к дополнительным вносимым потерям.

SIW-линии чаще рассматривают как часть высокочастотного тракта устройства с необходимостью перехода на микрополосковые линии для управления параметрами проходящего сигнала, что добавляет потери на переходы и в целом лишает конструкцию ее преимуществ.

В данной статье предложен способ реализации ключа для SIW-линий миллиметрового диапазона длин

волн с использованием фотопроводящего элемента, управляемого источником света ИК-диапазона. Такой фотопроводящий ключ (ФК) интегрируется на поверхности печатной платы SIW-линии, не требует схемы смещения и управления и дополнительных внешних компонентов, а элементы согласования могут быть реализованы непосредственно внутри SIW-линии. За счет минимизации количества требуемых компонентов обеспечивается упрощение конструкции и снижение общей стоимости устройства. Сам фотопроводящий ключ также имеет небольшую стоимость, определяемую преимущественно стоимостью используемого источника света - светодиода (Light Emission Diode - LED-элемент). Причем конструкция ФК будет оставаться универсальной даже при повышении рабочей частоты, в отличие от известных ключей, например p-i-n диодов и MEMS, которые для частот >10 ГГц значительно усложняются из-за требуемой миниатюризации, приводящей к увеличению их стоимости.

Дополнительной причиной искать альтернативы существующим ключам и рассматривать новые подходы является все возрастающая потребность в реконфигурируемых (перестраиваемых) антеннах [8] для миллиметрового диапазона длин волн, позволяющих с помощью модификации их геометрии и электрических параметров решать такие задачи как формирование нужного амплитудно-фазового распределения для управления шириной диаграммы направленности, усилением антенны и подавления боковых лепестков в требуемых направлениях; немеханическое сканирование лучом; перестроение по частоте; изменение поляризации. Для таких антенн SIW-линии и просто планарные волноводы также часто являются удобной базой [9, 10]. Однако для реализации реконфигурируемых антенн расположение ключей в определенной точке апертуры антенны является критически важным вопросом, решением которого могут стать описываемые здесь оптически-управляемые ключи, позволяющие легкое размещение даже большого количества элементов.

## II. ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ФОТОПРОВОДЯЩЕГО КЛЮЧА

Ранее в литературе описывалось применение фотопроводящих элементов для их интеграции в микрополосковые линии и осуществления их переключения [11, 12]. В качестве основного преимущества таких элементов отмечается линейность их характеристик и отсутствие необходимости в подведении к ним питающих линий, что значительно уменьшает интерференционные потери из-за связи управляющих линий постоянного тока и линий высоких частот, а также облегчает интеграцию таких ключей в любое место платы устройства. В работе [11] приводятся данные по потерям 1-2.5 дБ при подаче 200 мВт оптической мощности и изоляции >15 дБ для последовательно интегрируемого в зазор микрополосковой линии фотопроводящего элемента в диапазоне 1-10 ГГц. В работе [13] показана

работоспособность фотопроводящих элементов для частот вплоть до 110 ГГц. Здесь же приводится модель сканирующей оптоэлектронной антенны, выполненной на базе фотопроводящей подложки.

### A. Принцип работы фотопроводящего ключа

Физический принцип работы таких ключей основан на эффекте фотопроводимости, заключающийся в способности полупроводникового материала под действием света менять свои электрические свойства: в обычных условиях он является диэлектриком, когда электроны находятся на валентных энергетических уровнях атомов полупроводника; при воздействии света электроны получают дополнительную энергию и переходят с валентных уровней в зону проводимости, начиная характеризовать его как проводник. При достаточной добавочной концентрации электронов, перешедших в зону проводимости, такой материал может использоваться как переключающий элемент, имеющий два состояния: проводящее и не проводящее. При этом связь приложенной оптической мощности и добавочной проводимости описывается формулой (1) [14]:

$$I_{opt} = \frac{\Delta n \cdot h \cdot c \cdot t}{(1-R) \cdot \xi \cdot \tau_{eff}}, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  – концентрация неравновесных (добавочных) носителей, пересчитываемая в добавочную проводимость  $\Delta \sigma$  как  $\Delta \sigma = q (\Delta n \cdot \mu)$ ,  $\mu$  – подвижность носителей заряда;  $q$  – элементарный заряд;  $R$  – коэффициент отражения оптического излучения от полупроводника;  $\xi$  – квантовый выход полупроводника;  $t$  – толщина слоя полупроводника;  $\tau_{eff}$  – время жизни носителей заряда в полупроводнике;  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме.

В силу своей доступности, хорошо изученных свойств и отработанности технологии изготовления пластин, в большинстве случаев для ФК используют кремний. Однако в литературе также описана возможность использования германия Ge [11], соединения GaAs [16] и других полупроводников, обладающих некоторыми преимуществами по сравнению с кремнием, например, в скорости переключения, определяемой временем жизни носителей в полупроводнике и качеством поверхностей. При выборе полупроводникового материала также необходимо учитывать начальную концентрацию носителей заряда при рабочих температурах целевого устройства, которая может отличаться от нулевой, что будет добавлять потерь ФК или вовсе нарушит работу ключа.

В данной статье используется высокорезистивный кремний с сопротивлением порядка 10 кОм·см и временем жизни носителей порядка 6 мкс. Управление проводимостью осуществляется с помощью светодиода с длиной волны 940 нм, на которой кремний имеет практически максимальную эффективность поглощения излучения [14].

### В. Структура фотопроводящего ключа для SIW-линий

Основываясь на описанном принципе фотопроводимости, был разработан метод переключения SIW-линий с помощью фотопроводящих элементов. В отличие от представленных выше решений для микрополосковых линий и последовательного включения в них ФК, данный ФК работает по шунтирующей схеме, т.е. замыкании токов на землю для включенного (проводящего) состояния ФК (Рис. 1): в отсутствие света фотопроводящий элемент находится в диэлектрическом состоянии и пропускает ВЧ сигнал с минимальными потерями; при включении источника света фотопроводящий элемент переходит в проводящее состояние и, отражает ВЧ сигнал, замыкая ВЧ токи.

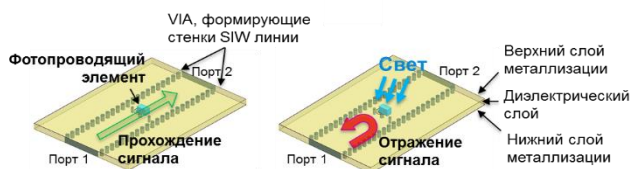


Рис. 1. Общая схема работы ФК в SIW-линии: режим прохождения и отражения сигнала

Преимуществом такой схемы работы является минимизация потерь сигнала на прохождение в выключенном (диэлектрическом) состоянии ФК. В этом случае достижимый уровень проводимости  $\sigma$  полупроводника, будет определять возможности изоляции ФК, что для некоторых применений более предпочтительно.

Детально структура SIW-ключа представлена на Рис. 2. Два ряда металлизированных переходных отверстий (Vertical Interconnect Access, VIA), расположенных между верхним и нижним слоями металлизации печатной платы, формируют волноведущую структуру. Расстояние между VIA вдоль направления распространения ВЧ-сигнала много меньше длины волны, что дает считать ее приближенной к прямоугольному волноводу с диэлектрическим заполнением [5]. В центре SIW-линии располагают VIA, выходная площадка которой изолирована зазором от верхней стенки волновода. Поверх этого зазора, соединяя площадку данной VIA и верхнюю стенку волновода, помещают фотопроводящий элемент. Он может быть зафиксирован на плате с помощью проводящего клея или с помощью паяного соединения, если на его нижней поверхности были предварительно нанесены, например с помощью электронной литографии, соответствующие контактные площадки. В прямом контакте, максимально близко к фотопроводящему элементу, располагают светодиод (LED-элемент), осуществляющий управление проводимостью ФК. С двух сторон относительно центральной VIA располагают дополнительные VIA, выполняющие роль индуктивной диафрагмы.

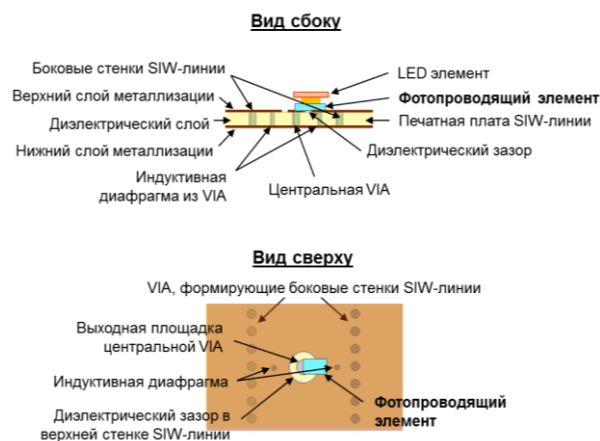


Рис. 2. Структура ФК в SIW-линии: вид сбоку и вид сверху

В выключенном (OFF) состоянии светодиода и отсутствии освещения фотопроводящий элемент находится в диэлектрическом состоянии и вместе с центральной VIA образует емкость  $C_{ФК}$ , которая компенсируется индуктивностью диафрагмы  $L$ , благодаря чему электромагнитные волны свободно и с минимальными потерями распространяются в реализованном волноводе. При воздействии света (состояние ON), фотопроводящий элемент приобретает проводимость, уменьшая свое сопротивление  $R_{ФК}$ , и замыкая ВЧ токи через центральную VIA. Чем выше проводимость ФК и меньше  $R_{ФК}$ , тем сильнее отражение сигнала от несокомпенсированной индуктивности диафрагмы и центральной VIA, что определяет изолирующие свойства ключа.

Эквивалентная схема работы описанного ФК представлена на Рис. 3:

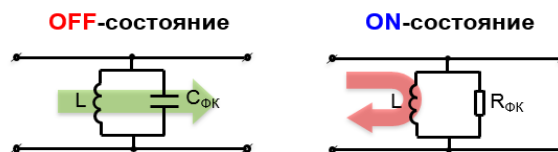


Рис. 3. Эквивалентная схема ФК для выключенного (светодиод выключен) и включенного (под действием света) состояний ключа

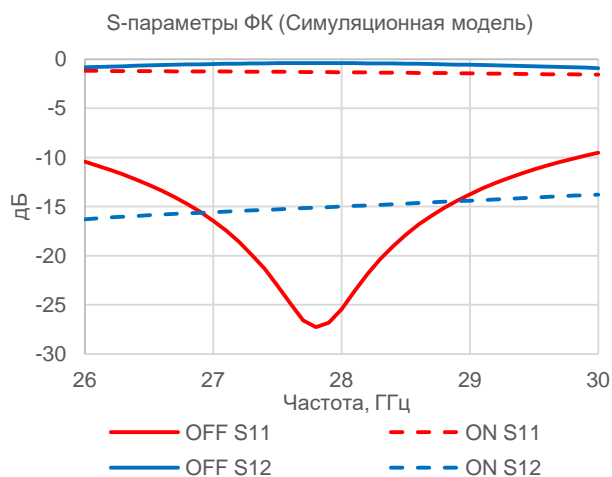
## III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

### А. Результаты моделирования

Описанный ФК был разработан и рассчитан в программном пакете ANSYS Electronics Desktop (HFSS) для работы в диапазоне 27-29 ГГц. Результаты расчета приведены на Рис. 4.

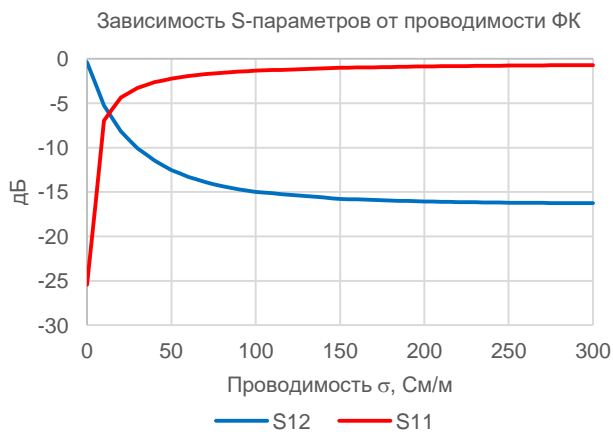
Для расчетной и экспериментальной моделей в качестве диэлектрической основы SIW-линии был выбран Rogers 4003 толщиной 508мкм. Фотопроводящий элемент моделировался как элемент размером 1мм x 0.5мм x 0.2мм, представляющий собой кремний с параметризованной проводимостью  $\sigma$  (См/м), равной 0См/м для выключенного состояния ФК.

Толщина кремния 200мкм была выбрана из доступного перечня пластин, так как это значение сопоставимо с эффективной глубиной проникновения света в кремнии [14] и является оптимальной с точки зрения обеспечения нужного уровня проводимости на его нижней поверхности при минимальной затрачиваемой оптической мощности.



**Рис. 4.** Эквивалентная схема ФК для выключенного (светодиод выключен) и включенного (под действием света) состояний ключа ( $\sigma=100\text{См/м}$ )

На Рис. 5 представлены графики коэффициентов отражения и прохождения ФК в зависимости от проводимости фотопроводящего элемента. Таким образом, минимальный уровень изоляции коммерчески доступных ключей сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, составляющий порядка 15дБ [15], достигается при проводимости кремния более 100См/м.



**Рис. 5.** Зависимость S-параметров ФК от проводимости  $\sigma$  (См/м) кремниевого элемента

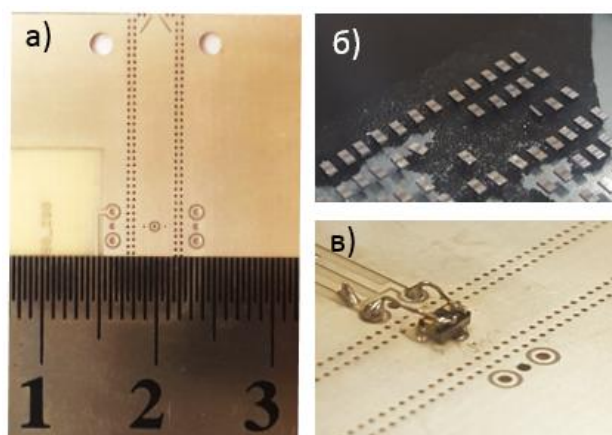
#### В. Описание экспериментальной модели ФК

Экспериментальная модель ФК и его составляющие представлены на Рис. 6. Для ее создания был отдельно рассчитан переход с микрополосковой линии на SIW-линию, описанный в [17]. Для

минимизации влияния разъемов на измеренные параметры была изготовлена система калибровки TRL-методом [18].

Для обеспечения оптического возбуждения кремния использовались LED-элементы производства компании Vishay с рабочей длиной волны 940нм [19]. Размер излучающей поверхности данных LED-элементов составляет  $\sim 300\text{нм} \times 300\text{нм}$ , что меньше размеров кремниевого элемента и поэтому позволяет избежать потерь оптической мощности.

Кремниевая пластина была нарезана на элементы размером 1мм x 0.5мм, на которые предварительно с помощью метода электронной литографии были нанесены медные контактные площадки. Кремниевый элемент припаивался в соответствующее место SIW-линии, а на его поверхность приклеивался LED-элемент, к которому припаивались проводники для подачи питающего напряжения и тока.



**Рис. 6.** Фотографии изготовленных элементов ФК: а) изготовленная печатная плата с выполненной SIW-линией и печатными элементами, составляющими ФК; б) нарезанные кремниевые элементы с металлизированными контактными площадками; в) ФК в сборке с LED-элементом

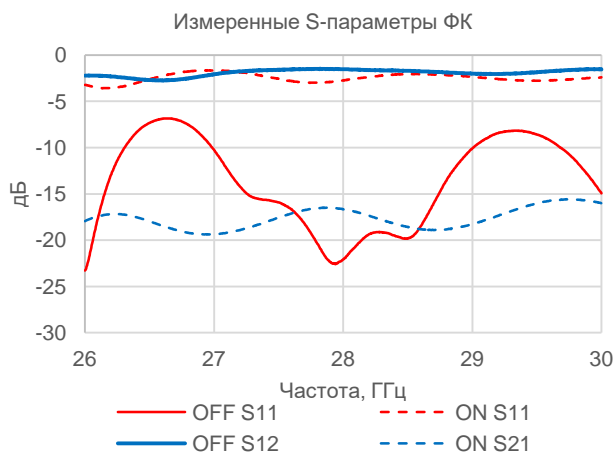
#### С. Результаты измерения

На Рис. 7 представлены результаты измерения описанного ФК при подаче на него 50мВт излученной LED-элементом оптической мощности.

Данные графики приведены без вычета потерь в линии, которые по результатам измерения референсной SIW-линии без ФК составляют 1.02дБ на частоте 28ГГц.

В соответствии с зависимостями на Рис. 5, полученные результаты соответствуют уровню проводимости порядка 100См/м.

В табл. 1 представлено сравнение результатов, полученных при моделировании и в эксперименте. Разницу в значениях можно объяснить погрешностью изготовления печатной платы, ручной сборкой ФК, а также неидеальной отстройкой от разъемов, которая также повлияла на сужение рабочей полосы ФК.



**Рис. 7. Результаты измерения ФК. Данные для состояния ON представлены для 50мВт излученной мощности LED-элемента**

Таблица 1

*Сравнение результатов моделирования и эксперимента на частоте 28ГГц*

	Результаты моделирования, дБ	Результаты измерения, дБ
S11 OFF	-25.40	-21.00
S12 OFF	-0.40	-0.49
S11 ON@100См/м	-1.33	-1.70
S12 ON@100См/м	-15.00	-15.65

#### IV. ДАЛЬНЕЙШАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФК

Структура представленного ФК может быть модифицирована для получения, например, большего уровня изоляции. Это может быть достигнуто за счет увеличения площади используемого фотопроводящего элемента и перекрытия им всего зазора между центральной VIA и верхней стенкой волновода. При фиксированной достигаемой проводимости элемента это уменьшит сопротивление кремниевого элемента во включенном состоянии и увеличит эффективность шунтирования высокочастотных токов, однако увеличит габаритные размеры элемента.

Также оптимизацию ФК можно провести с точки зрения увеличения достигаемого уровня проводимости фотопроводящего элемента при уменьшении подводимой к нему оптической мощности. Решение данной задачи основано на увеличении эффективного времени жизни носителей заряда в объеме фотопроводящего элемента и на его поверхности. Эти вопросы широко исследованы в области разработки элементов для солнечных батарей и улучшения их КПД [20]. Увеличение времени жизни, однако, приводит к увеличению времени рекомбинации возбужденных носителей, а значит к увеличению времени выключения ФК.

Обратную задачу уменьшения времени включения/выключения ФК можно решить за счет уменьшения времени жизни носителей, что можно достичь, например, с помощью ионной имплантации или электронной бомбардировки [21] фотопроводящего элемента и внесения в его кристаллическую решетку дефектов, являющихся для носителей заряда дополнительными центрами рекомбинации.

Время включения/выключения ФК при использовании необработанных кремниевых элементов составило порядка нескольких мкс.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен подход для реализации оптически-управляемых переключателей компонентов миллиметрового диапазона длин волн для волноводных структур, реализованных в печатных платах (SIW-линий). Описанный ключ работает на основе эффекта фотопроводимости и возможности полупроводников под воздействием света изменять свои электрические свойства, переходя из диэлектрического состояния в проводящее. Преимуществом такого подхода является отсутствие схем питания и управления, что уменьшает вносимые потери ключа из-за пересечения и интерференции с ВЧ трактом устройства.

Описанный подход реализации ФК является практически универсальным и может быть просто масштабирован для частот вплоть до ТГц, ограничиваясь только возможностями изготовления печатных плат.

Предложенная конструкция ключа является крайне простой, удобной для сборки и очень дешевой, что актуально для миллиметрового диапазона длин волн, где стоимость компонентов, по сравнению с сантиметровым диапазоном, возрастает в разы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят ЦКП МФТИ и ФГБНУ ТИСНУМ за изготовление используемых в эксперименте кремниевых элементов и исследование влияния обработки полупроводников на время жизни носителей.

#### ПОДДЕРЖКА

Данная работа была выполнена в рамках исследовательского проекта в ООО «Исследовательский Центр Самсунг»

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL:[http://www.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public\\_policy\\_position\\_5g\\_spectrum.pdf?la=en](http://www.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf?la=en) (дата обращения: 11.04.2018).
- [2] “Radar Technology” Edited by Guy Kouemou, ISBN 978-953-307-029-2, 430 pages, Publisher: InTech, Chapters published January 01, 2010 under CC BY-NC-SA 3.0 license.

- [3] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_Gigabit\\_Alliance](https://ru.wikipedia.org/wiki/Wireless_Gigabit_Alliance) (дата обращения: 11.04.2018).
- [4] URL: <http://www.analog.com/en/technical-articles/5g-the-microwave-perspective.html> (дата обращения: 11.04.2018).
- [5] Панасюк Ю.Н., Пудовкин А. П. Устройства сверхвысоких частот. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 80 с.
- [6] Пазухина Т. Г. Волноводные фазовращатели на p-i-n диодах с планарными петлями связи: автореферат кандидата технических наук. Саратовский государственный технический университет, Саратов, 2009.
- [7] URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12615057/index.pdf> (дата обращения: 11.04.2018).
- [8] Christos G. Christodoulou, Fellow IEEE, Youssef Tawk, Steven A. Lane, and Scott R. Erwin Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications // Proceedings of the IEEE . July 2012. Vol. 100. No. 7. P. 2250-2261
- [9] Bahram Khalichi, Saied Nikmehr, and Ali Pourziad Reconfigurable siw antenna based on RF-MEMS switches // Progress In Electromagnetics Research. 2013. Vol. 142. 189–205.
- [10] Alireza Pourghorban Saghati, Kamran Entesari A Reconfigurable SIW Cavity-Backed Slot Antenna With One Octave Tuning Range // IEEE Transactions On Antennas And Propagation. 2013. VOL. 61. NO. 8. P. 3937-3945.
- [11] Emma Kristina Kowalczyk. Simulating, fabricating and characterising photoconductive microwave switches for RF applications: A Doctoral Thesis. Loughborough University, 2014.
- [12] Flemish J. R., Kwan H. W., Haupt R. L. and Lanagan M. A new silicon-based photoconductive microwave switch // Microwave and Optical technology letters. 2009. Vol. 51. No.1.
- [13] Gallacher Tom F., Rune Sondenå, Robertson Duncan A. Optical Modulation of Millimeter-Wave Beams Using a Semiconductor Substrate // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2012. Vol. 60. No. 7. P. 2301-2309.
- [14] Gallacher Tom F. Optoelectronic modulation of mm-wave beams using a photo-injected semiconductor substrate: A PhD Thesis, University of St Andrews, 2012.
- [15] URL: <https://www.digikey.com/products/en/rf-if-and-rfid/rf-switches/865?FV=ffe00361&quantity=&ColumnSort=1668&page=1&k=SPDT&pageSize=500> (дата обращения: 11.04.2018).
- [16] Karabegovic A., O'Connell R. M., and Nunnally W. C. Photoconductive switch design for microwave applications // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. vol. 16, No. 4.
- [17] Xiao-Ping Chen, Ke Wu. Low-loss ultra-wideband transition between conductor-backed coplanar waveguide and substrate integrated waveguide // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2009. P. 349 – 352.
- [18] Fleury J., Bernard O. Designing and Characterizing TRL Fixture Calibration Standards for Device Modeling // Applied Microwave & Wireless. P. 24-42. URL: <http://www.cel.com/pdf/press/TRL.pdf> (дата обращения: 11.04.2018).
- [19] URL: <http://www.vishay.com/docs/84271/vsmy1940itx01.pdf> (дата обращения: 11.04.2018).
- [20] Dingemans G., Kessels W. M. M. Status and prospects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based surface passivation schemes for silicon solar cells // J. Vac. Sci. Technol. 2012. A 30(4)
- [21] Wright N.M., Thomson D.J., Litvinenko K.L., Headley W.R., Smith A.J., Knights A.P., Deane J.H.B., Gardes F.Y., Mashanovich G.Z., Gwilliam R., Reed G.T. Free carrier lifetime modification for silicon waveguide based devices // Optics Express. 2008. Vol. 16, No. 24.

## Photoconductive switch for mmWave Substrate Integrated Waveguide (SIW)

E.A. Shepeleva, M.N. Makurin, A.Yu. Nikishov, A.S. Lukyanov, G.A. Evtyushkin

LLC "Samsung Research Center" Moscow, e.shepeleva@samsung.com

**Abstract** — This paper presents a new approach to switching of mmWave substrate integrated waveguide (SIW) structures by using light controlled photoconductive element. Without light this element presents dielectric material and passes electromagnetic waves. Under illumination it becomes conductive, shunts RF currents and reflects the signal.

Due to light control, proposed switch is electrically separated from RF paths of device and solves the problem of other switches (PIN diodes, MEMS, MOSFETs) requiring large control and bias circuits that leads to increasing of insertion loss and size of device, and reduction of its bandwidth.

As a result, proposed switch is very convenient for integration into PCB antenna devices. Its simple structure and universality of approach make it suitable for 10-100GHz applications limited by PCB fabrication facilities only.

The achieved and experimentally confirmed switch's parameters: isolation is >15dB, insertion loss is <0.5dB.

**Keywords** — Photoconductive switch, substrate integrated waveguide, mmWave

### REFERENCES

- [1] URL:[http://www.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public\\_policy\\_position\\_5g\\_spectrum.pdf?la=en](http://www.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf?la=en) (last accessed 11.04.2018).
- [2] "Radar Technology" Edited by Guy Kouemou, ISBN 978-953-307-029-2, 430 pages, Publisher: InTech, Chapters published January 01, 2010 under CC BY-NC-SA 3.0 license.

- [3] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_Gigabit\\_Alliance](https://ru.wikipedia.org/wiki/Wireless_Gigabit_Alliance) (last accessed 11.04.2018).
- [4] URL: <http://www.analog.com/en/technical-articles/5g-the-microwave-perspective.html> (last accessed 11.04.2018).
- [5] Panasyuk Yu.N., Pudovkin AP The devices of ultrahigh frequencies. Tambov: FGBOU HPE "TSTU", 2015. 80 p.
- [6] T. G. Pazukhina. Waveguide phase shifters on p-i-n diodes with planar coupling loops: PhD thesis. Saratov State Technical University, Saratov, 2009.
- [7] URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12615057/index.pdf> (last accessed 11.04.2018).
- [8] Christos G. Christodoulou, Fellow IEEE, Youssef Tawk, Steven A. Lane, and Scott R. Erwin Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications // Proceedings of the IEEE . July 2012. Vol. 100. No. 7. P. 2250-2261
- [9] Bahram Khalichi, Saied Nikmehr, and Ali Pourziad Reconfigurable siw antenna based on RF-MEMS switches // Progress In Electromagnetics Research. 2013. Vol. 142. 189–205.
- [10] Alireza Pourghorban Saghati, Kamran Entesari A Reconfigurable SIW Cavity-Backed Slot Antenna With One Octave Tuning Range // IEEE Transactions On Antennas And Propagation. 2013. VOL. 61. NO. 8. P. 3937-3945.
- [11] Emma Kristina Kowalczyk. Simulating, fabricating and characterising photoconductive microwave switches for RF applications: A Doctoral Thesis. Loughborough University, 2014.
- [12] Flemish J. R., Kwan H. W., Haupt R. L. and Lanagan M. A new silicon-based photoconductive microwave switch // Microwave and Optical technology letters. 2009. Vol. 51. No.1.
- [13] Gallacher Tom F., Rune Sondenå, Robertson Duncan A. Optical Modulation of Millimeter-Wave Beams Using a Semiconductor Substrate // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2012. Vol. 60. No. 7. P. 2301-2309.
- [14] Gallacher Tom F. Optoelectronic modulation of mm-wave beams using a photo-injected semiconductor substrate: A PhD Thesis, University of St Andrews, 2012.
- [15] Karabegovic A., O'Connell R. M., and Nunnally W. C. Photoconductive switch design for microwave applications // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. vol. 16, No. 4.
- [16] Xiao-Ping Chen, Ke Wu. Low-loss ultra-wideband transition between conductor-backed coplanar waveguide and substrate integrated waveguide // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2009. P. 349 – 352.
- [17] Fleury J., Bernard O. Designing and Characterizing TRL Fixture Calibration Standards for Device Modeling // Applied Microwave & Wireless. P. 24-42. URL: <http://www.cel.com/pdf/press/TRL.pdf> (last accessed: 11.04.2018).
- [18] URL: <http://www.vishay.com/docs/84271/vsmy1940itx01.pdf> (last accessed: 11.04.2018).
- [19] Dingemans G., Kessels W. M. M. Status and prospects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based surface passivation schemes for silicon solar cells // J. Vac. Sci. Technol. 2012. A 30(4)
- [20] Wright N.M., Thomson D.J., Litvinenko K.L., Headley W.R., Smith A.J., Knights A.P., Deane J.H.B., Gardes F.Y., Mashanovich G.Z., Gwilliam R., Reed G.T. Free carrier lifetime modification for siliconwaveguide based devices // Optics Express. 2008. Vol. 16, No. 24.