



УДК 535.8

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.299.300

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОННЫХ АЦП И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

## PRINCIPLES OF DESIGNING PHOTON ADC AND PROSPECTS FOR THEIR IMPLEMENTATION IN INTEGRAL PERFORMANCE

САПЕГИН АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ<sup>1</sup>

asapegin@niime.ru

SAPEGHIN ALEXANDER A.<sup>1</sup>

asapegin@niime.ru

БАРАБАНИНКОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ<sup>1,2</sup>

BARABANENKOV MIKHAIL YU.<sup>1,2</sup>

ИТАЛЪЯНЦЕВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ<sup>1</sup>

ITALYANTSEV ALEXANDER G.<sup>1</sup>

МАКАРОВ МИХАИЛ ЭРНСТОВИЧ<sup>1,2</sup>

MAKAROV MIKHAIL E.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем технологии

микроэлектроники и обособленных материалов РАН»

<sup>1</sup> Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

<sup>2</sup> Institute of Microelectronics Technology RAS

Приведен обзор работ в области фотонного аналого-цифрового преобразования (АЦП), рассмотрено современное состояние и фундаментальные пределы скорости преобразования и разрядности фотонных АЦП, обсуждаются возможности и перспективы встраивания фотонных АЦП в кремниевую технологию.

*Ключевые слова:* фотонные АЦП; аналого-цифровое преобразование; радиофотоника; интегральная фотоника; кремний на изоляторе; КНИ.

The paper reviews researches in photonic analog-to-digital converters (ADC), as well as the current state and fundamental limits in resolution and sampling frequency of photonic ADCs. In addition, it discusses possibilities and prospects for embedding photonic ADCs in silicon technology.

*Keywords:* photonic ADCs; analog-to-digital conversion; radiophotonics; integrated photonics; "silicon-on-insulator"; SOI.

Одним из основных направлений развития микроэлектроники сегодня является увеличение скорости передачи и обработки информации. Увеличение скорости путем совершенствования электронных интегральных схем (ИС) достигает физического и технологического предела [1]. Передовые топологические нормы на данный момент составляют десятки нанометров. Дальнейшее уменьшение размера транзистора приближает его к размеру нескольких атомов, что обуславливает существенный вклад квантовых эффектов в параметры транзисторов. Одним из альтернативных решений является разработка гибридных фотонных интегральных схем (ФИС) по причине более высокой скорости передачи сигнала и меньших тепловых потерь в таких системах. Кроме того, ФИС потенциально позволяют расширить имеющийся динамический частотный диапазон на 3–4 порядка (до  $10^{15}$  Гц). В связи с данными факторами построение ФИС является одним из приоритетных направлений развития ведущих научных центров и предприятий микроэлектронной промышленности (Intel, IBM) [2].

Фотонный АЦП является одним из ярких примеров перспективных ФИС. Современные электронные АЦП способны работать со скоростями дискретизации выше 60 Гбит/с при разрядности около 8 битов. Однако прогресс АЦП ощутимо меньше в сравнении с прогрессом микропроцессоров: в период с 1980 по 2000 годы скорость преобразования серийных АЦП выросла всего лишь в 10 раз, в то время как производительность цифровых процессоров возросла на несколько порядков [3]. В настоящий момент

электронные АЦП подходят к фундаментальным пределам своих характеристик, связанных с такими ограничениями, как апертурная шибка и неопределенность компараторов [4, 5]. Вышесказанное подталкивает научное сообщество к созданию АЦП на альтернативных физических принципах.

Логика принципов реализации фотонных АЦП (далее ФАЦП) базируется на двух фундаментальных принципах аналого-цифрового преобразования как такового: дискретизации (разбиения аналогового сигнала по временным отрезкам) и квантования (разбиения амплитуды аналогового сигнала по двоичным разрядам). Таким образом, на основе этих принципов можно выделить три класса ФАЦП [6]:

- 1) с оптической дискретизацией и электронным квантованием;
- 2) с электронной дискретизацией и оптическим квантованием;
- 3) с оптической дискретизацией и оптическим квантованием («полностью оптические» АЦП).

На сегодняшний день большинство оптических АЦП создается с использованием оптоволокна и отдельно стоящего оборудования (лазеров, интерферометров и т. п.) в размерах «рабочего стола». Одновременно с этим предпринимаются попытки миниатюризации и интеграции ФАЦП в кремниевую технологию. Магистральным направлением такой интеграции является использование волноводов на основе КНИ (кремний на изоляторе), имеющих окно прозрачности в районе длин волн  $\lambda = 1,4\text{--}1,6$  мкм. В рамках единой кремниевой схемы становится возможным создание модуляторов



Маха – Цендера, оптических волноводов, демультиплексоров, фотодетекторов и электронных частей постоптической обработки (электронных АЦП и постпроцессоров).

В совокупности с вышесказанным развитие систем ввода излучения в кремниевые волноводы (таперы, дифракционные решетки) и встраиваемых миниатюрных фемтосекундных лазеров потенциально позволяет создавать фотонные АЦП на единой кремниевой микросхеме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
2. Макушин М., Хомчик А., Современное состояние и перспективы развития фотонных ИС // Экспресс-информация по зарубежной электронной технике, вып. 10, 2017.
3. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной электроники, 2015. — № 2. — С. 3–39.
4. Свидзинский К.К. Фотонные АЦП (обзор последних достижений) // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3. — С. 41–52.
5. Valley G., Hurrell J., Seifer G. Photonic analog-to-digital converters: fundamental and practical limits, Proc. of SPIE, 2004. P. 96–106.
6. Valley G. Photonic analog-to-digital converters: A tutorial, OFC/NFOEC, 2009.

### КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1090 руб.

Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни  
Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж.  
**ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ  
ФОТОНИКИ**

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 376 с.  
ISBN 978-5-94836-445-2

при поддержке Департамента промышленности обычных вооружений, боеприпасов и спецхимии Минпромторга России перевод с английского д. т. н. М. Е. Белкина, к. ф.-м. н. И. В. Мельникова, к. ф.-м. н. В. П. Яковлева под редакцией д. т. н., д. э. н., проф. С. Ф. Боева, акад. РАН, д. ф.-м. н., проф. А. С. Сигова

В современном понимании фотоника означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная оптоэлектроника появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. В развитие СВЧ-оптоэлектроники в нашей стране получил распространение новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники.

Цели и задачи РФ: исследование и разработка сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне и их применение в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

Данное издание представляет собой фундаментальное последовательное описание физических основ исследований и разработок в области компонентной базы и оборудования радиофотонных систем. Книга состоит из 10 глав. Отдельная глава посвящена еще слабо изученным вопросам разработки мощных высоколинейных фотодетекторов, в которых NRL является признанным мировым лидером. Помимо основных глав книга включает шесть приложений, облегчающих понимание использованного математического аппарата. Важной методической особенностью данной книги является согласованное изложение методов, принципов и подходов, изученных еще в прошлом столетии и введенных в последние 2–3 года.

Книга предназначена главным образом для студентов высшей школы и аспирантов, обучающихся по направлению «Фотоника», но также может быть полезна для преподавательского состава, для разработчиков аппаратуры в рамках этого только развивающегося в России направления науки и техники, а также для научных и технических специалистов в смежных областях.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru