

Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n -GaAs

А.И. Михайлов, А.В. Митин, И.О. Кожевников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012, Российская Федерация, г. Саратов
ул. Астраханская, 83

В работе описывается опытный вариант однокристалльного преобразователя свет-частота, представляющего собой мезапланарную фоторезисторную структуру на основе высокоомного арсенида галлия с N -образной вольт-амперной характеристикой. Показаны функциональность и перспективность применения предложенного фотоэлектрического преобразователя для оптоэлектроники. Приведены основные характеристики, проанализированы преимущества и недостатки предложенного преобразователя перед имеющимися аналогами.

Ключевые слова: функциональная микроэлектроника, полужолирующий арсенид галлия, рекомбинационная неустойчивость тока, фотоэлектрические преобразователи.

Введение

Развитие цифровой электроники тесно связано с возможностями интегральной микроэлектроники. Одним из наиболее перспективных направлений современной микроэлектроники является функциональная микроэлектроника, основанная на использовании динамических неоднородностей, обеспечивающих несхематические принципы работы устройств. В функциональной микроэлектронике используется взаимодействие потоков электронов с волновыми процессами в твердых телах, свойства полупроводников, диэлектриков, магнетиков и сверхпроводников в магнитных и электрических полях и др. [1; 2]. Использование возможностей функциональной микроэлектроники позволяет заменить сложные интегральные схемы их функциональными аналогами, что, в свою очередь, дает очевидные преимущества: меньший размер, простота конструкции, меньшее энергопотребление и др.

Как известно, все современные полупроводниковые датчики являются аналоговыми приборами, и для применения их в цифровой электронике необходимо использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Кроме дополнительного потребления электроэнергии, АЦП также вносит погрешности в детектируемый сигнал, которые включают ошибки квантования и апертурные ошибки [3]. Подобные системы плохо подходят для детектирования сложных

сигналов в различных измерительных устройствах и системах передачи данных. Избавиться от указанных недостатков можно, отказавшись от использования АЦП и совместив функции детектора и АЦП в одном функциональном приборе. В данной работе предлагается вариант реализации такого функционального фотоэлектрического преобразователя на основе высокоомного арсенида галлия.

Высокоомный n -GaAs является нелинейной активной средой, в которой возможно наблюдение характерной неустойчивости тока, обусловленной механизмом захвата электронов глубокими примесными центрами под действием сильного электрического поля (рекомбинационная неустойчивость тока) [4]. Образующиеся при этом динамические неоднородности в объеме полупроводника (домены) вызывают колебания тока во внешней цепи.

Возможность применения рекомбинационной неустойчивости тока в функциональной электронике была описана в работе [5]. Предложенные авторами фотоэлектрические преобразователи представляют собой эпитаксиальные транзисторные p^+n -структуры на основе кремния с локальным контактом на n -области. Авторы также показали высокую функциональность и перспективность применения таких фотопреобразователей в оптоэлектронике.

Использование арсенида галлия в качестве материала для разрабатываемого функциональ-

ного фотоэлектрического преобразователя, в отличие от кремния, представляется более перспективным. Во-первых, чувствительность к видимому ИК- и УФ-излучению [6] в зависимости от структуры и примесного состава позволяет использовать такие фотопреобразователи в более широком оптическом диапазоне. Кроме того, эпитаксиальные структуры на основе GaAs также применяются в качестве детекторов рентгеновского излучения [7]. Во-вторых, устойчивость к более высоким температурам обеспечивает функционирование в условиях, когда кремниевые фотодетекторы неприменимы. В-третьих, высокая подвижность электронов, почти на порядок превышающая подвижность электронов в кремнии, позволяет повысить быстродействие прибора. Кроме того, наряду с рекомбинационной неустойчивостью тока в структурах на основе арсенида галлия возможно наблюдение известного эффекта Ганна, что может позволить существенно повысить рабочие частоты таких функциональных фотоэлектрических преобразователей.

1. Конструкция однокристального преобразователя свет-частота

Функциональный однокристальный преобразователь свет-частота представляет собой планарно-эпитаксиальную мезаструктуру на основе высокоомного n -GaAs с двумя омическими контактами, схожую по конструкции с фоторезистором (рис. 1). Длина засвечиваемой области (расстояние между омическими контактами) лежит в диапазоне 50–200 мкм. Ограничение в сторону больших значений длины связано с увеличением порогового напряжения возникновения токовых колебаний, в сторону меньших значений длины – с уменьшением фоточувствительности.

Схема включения функционального преобразователя свет-частота, представленная на рис. 1, состоит из источника питания $U_{\text{пит}}$ и нагрузочного резистора $R_{\text{н}}$. Сигнал, представляющий собой колебания напряжения на нагрузочном резисторе, частота которых зависит от мощности падающего излучения, снимается с вывода $f(P_{\text{изл}})$.

Использование планарно-эпитаксиальных мезаструктур позволяет получить комбинированное действие двух физических явлений: рекомбинационной неустойчивости тока и внутреннего фотоэффекта. Исследования показали, что в

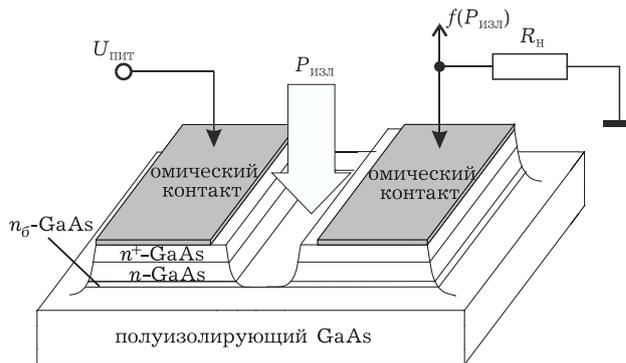


Рис. 1. Структура и схема включения функционального преобразователя свет-частота

таких структурах возможно наблюдение осцилляций тока, параметры которых в существенной степени определяются величиной постоянного приложенного напряжения, интенсивностью и локализацией засветки электромагнитным излучением из диапазона длин волн, соответствующих собственному поглощению арсенида галлия, и рядом других факторов [8; 9].

2. Функциональные возможности однокристального преобразователя свет-частота

На рис. 2, а приведена характерная форма колебаний тока на нагрузочном резисторе $R_{\text{н}}$ (100 Ом), включенном последовательно с преобразователем, и характерная N-образная вольт-амперная характеристика с участком отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), соответствующим возникновению токовых колебаний. Как видно из рис. 2, а, уровень выходного сигнала достаточен для согласованной работы с любым цифровым считывающим устройством. Из осциллограммы на рис. 2, б следует, что воздействие засветки оптическим излучением с длиной волны, соответствующей собственному поглощению GaAs, приводит к росту частоты токовых колебаний. При этом характер данной зависимости близок к линейной, что представляется очень важным с точки зрения создания измерительного прибора.

Согласно приведенной на рис. 2, б осциллограмме, имеют место переходные процессы при изменении уровня освещенности, что может быть связано с процессом рассасывания носителей заряда, сгенерированных под действием оптического излучения и приводящих к росту постоянной составляющей тока через структуру. Такие переходные процессы негативно сказываются на быстродействии преобразователя,

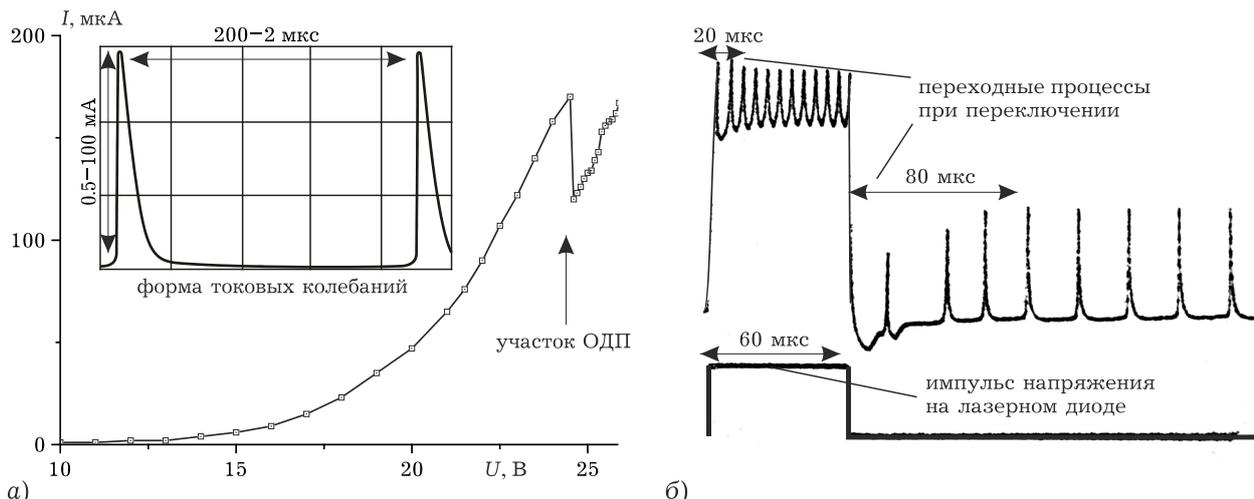


Рис. 2. Параметры наблюдаемых колебаний тока: а) ВАХ и форма токовых колебаний на нагрузочном сопротивлении; б) осциллограмма переходных процессов при засветке лазером (650 нм) в импульсном режиме

однако в известных аналоговых детекторах они также наблюдаются.

Как известно, изменение значения частоты сигнала регистрируется с большей точностью, чем изменение величины напряжения или тока. Кроме того, как можно видеть на рис. 2, а и б, в режиме генерации постоянная составляющая тока, протекающего через структуру, может быть в 1,5 и более раз меньше, чем в предпороговом. Таким образом, прибор, выдающий сигнал в виде периодически повторяемых колебаний, обладает более высокой измерительной точностью и имеет меньшее энергопотребление.

Кроме основной функции прямого преобразования светового сигнала в цифровой, с помощью предлагаемого фотопреобразователя можно получать более широкие функциональные возможности. Например, тот факт, что колебания тока возникают при фиксированном пороговом напряжении, позволяет использовать такой преобразователь в качестве логического ключа, поскольку на зависимости частоты колебаний от приложенного напряжения присутствуют два устойчивых положения, соответствующих логической единице (колебания тока присутствуют) и логическому нулю (колебания отсутствуют).

Также в ходе экспериментальных исследований наблюдалось следующее явление: при превышении некоторого порога интенсивности падающего оптического излучения из диапазона, соответствующего собственному поглощению GaAs, происходит срыв генерации. На рис. 3 приведена характерная для данного случая зависимость частоты колебаний от мощности сфокусированного излучения лазерного диода с длиной волны 650 нм. Как видно, на данной зависимости

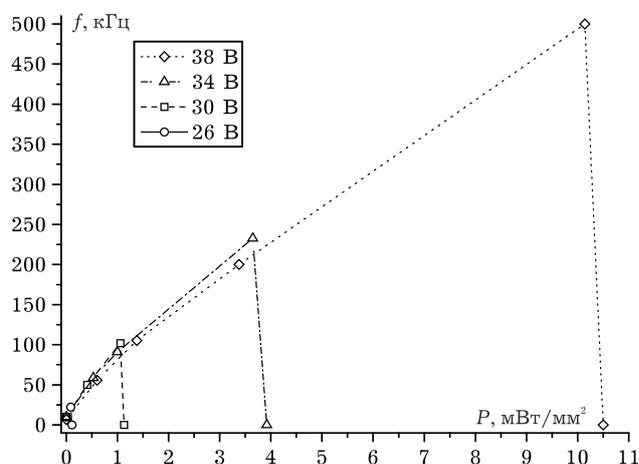


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний от мощности сфокусированного лазерного излучения при различном напряжении на структуре

имеется два устойчивых положения, соответствующих логической единице (колебания тока присутствуют) и логическому нулю (колебания отсутствуют), переключение между которыми осуществляется засветкой конечной интенсивности (мощности). При этом величина порогового значения мощности оптического излучения, соответствующего срыву генерации, зависит от приложенного напряжения. Все это позволяет использовать такой преобразователь в качестве оптически-переключаемого логического элемента «НЕ» (инвертора).

Аналогично, исходя из зависимостей $f(P_{\text{изл}})$ (рис. 3), преобразователь свет-частота также может выполнять роль логического элемента «И-НЕ», если уровень интенсивности (мощности) двух и более оптических сигналов при сложении будет больше или равен величине порогового уровня интенсивности (мощности), соответствующей срыву генерации.

Совместное проявление описанных свойств функционального преобразователя, а именно появление колебаний тока при пороговом значении напряжения и их исчезновение при пороговом значении мощности засветки, позволяет использовать такой преобразователь в качестве переключаемого элемента, управляемого двумя различными по природе сигналами.

Помимо этого, на части экспериментальных образцов наблюдалось еще одно явление. При засветке структуры оптическим излучением происходит срыв генерации подобно описанному ранее случаю, однако полное прекращение засветки не приводит к возобновлению генерации при неизменной величине приложенного напряжения. Генерация возобновляется лишь при кратковременном увеличении приложенного напряжения на 1 В и более относительно исходного. На данном эффекте может быть реализована энергозависимая оптически переключаемая ячейка памяти, в которой сигналом о состоянии является не величина напряжения, а величина частоты колебаний.

Преимущество в таком способе формирования сигнала состоит в том, что сигналы в виде периодических колебаний с отличающейся частотой могут распространяться совместно по одному информационному каналу, разделяясь фильтрами на выходе. Таким образом, с помощью линейки параллельно соединенных общими шинами питания ячеек можно производить двоичное кодирование информации засветкой отдельных ячеек (при этом на них установится логический «0», а на незасвеченных останется «1»). Подбором активных длин каждой ячейки можно добиться того, что выходной сигнал с такой линейки будет содержать набор импульсов, различающихся частотой и амплитудой, каждый из которых можно переключать оптическим сигналом.

Поскольку планарная технология с использованием фотолитографии позволяет формировать большое количество структур на одной полупроводниковой пластине, исследовалась возможность создания матрицы таких функциональных фотоэлектрических преобразователей на одном кристалле [8]. Экспериментальные образцы содержали по 10 планарно-эпитаксиальных мезоструктур, соединенных параллельно шинами питания. Вследствие недостаточной отработки технологии изготовления экспериментальных образцов, максимальное число одно-

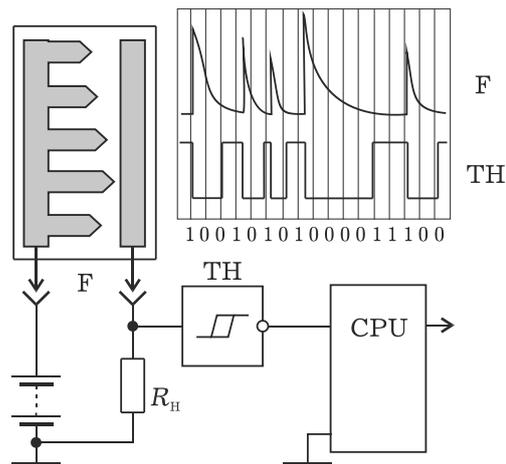


Рис. 4. Упрощенная электрическая схема кодовой системы

временно функционирующих элементов не превышало 70 %, при этом также отличались частота и амплитуда возникающих колебаний тока и пороговое напряжение. Дополнительные исследования влияния технологических факторов на параметры колебаний и отработка соответствующих технологий сделают возможным контролируемое создание параллельных элементов с необходимыми параметрами. На данном этапе из экспериментальных данных известен лишь характер влияния длины активной области (межконтактного расстояния) на пороговое напряжение возникновения колебаний и фоточувствительность [9].

На рис. 4 представлен вариант схемы преобразователя «мощность излучения – двоичный код», где функциональный элемент выполнен в виде линейки фотоэлектрических преобразователей с различающимися длинами активных областей. Здесь кристалл с характерным рисунком низкоомных участков представляет собой информационный носитель двоичного кода, формируемого структурой при подаче на нее порогового напряжения, в виде сложения колебаний, возникающих на отдельных элементах и различающихся частотой и амплитудой (сигнал F на рис. 4). Данный сигнал преобразуется триггером Шмитта во внешней цепи в последовательность импульсов, содержащих двоичный код (сигнал TH на рис. 4). Затем двоичный код считывается микроконтроллером CPU и сравнивается с кодом, заложенным в его память. Поскольку активные области элементов имеют различную длину, то характер зависимости частоты колебаний от мощности оптического излучения будет различаться для каждого элемента [9]. В результате получим перестраиваемый двоичный код со сложной системой перестройки.

Таблица

Преобразователи Характеристики	TSL 237	TSL 245	Опытный образец
Напряжение питания	5 В	5 В	25 ± 5 В
Максимальная частота	1 МГц	500 кГц	500 кГц
Выходное напряжение высокого уровня	4,7 В	4,5 В	4,5 В
Энергопотребление	4,3–18 мВт	5,5–18 мВт	4–8 мВт

Поскольку система перестройки двоичного кода от мощности падающего излучения в данном случае является уникальной для конкретного рисунка низкоомных участков формирователя кода, описанный принцип можно успешно использовать для создания системы защиты от несанкционированного доступа. Дополнительным преимуществом данной кодовой системы является малый размер носителя кодовой информации (ключа). Его поперечный размер может составлять порядка 0,5 мм, а продольный зависит от количества элементов, что определяет сложность хранимого двоичного кода.

3. Аналоги функционального преобразователя свет-частота

Имеющиеся в настоящее время на рынке аналоги преобразователя свет-частота компаний TAOS Inc. и Hamamatsu представляют собой интегральные схемы, состоящие из фотодиода и интегральной схемы преобразователя ток-частота. В таблице приведены сравнительные характеристики двух моделей таких преобразователей и опытного экспериментального образца фотоэлектрического однокристалльного преобразователя. Исходя из паспортных данных, энергопотребление преобразователей TSL превышает энергопотребление экспериментальных образцов в 2 раза. В таблице приведены сравнительные характеристики интегральных преобразователей свет-частота и разрабатываемого однокристалльного преобразователя свет-частота.

Согласно экспериментальным результатам, преобразователь свет-частота в виде отдельного однокристалльного элемента имеет меньшее энергопотребление без критичных отличий основных рабочих параметров уже на начальной стадии разработки и без проведения оптимизации технологии.

Заключение

Таким образом, предложенный в данной работе функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n -GaAs может быть реализован с помощью широко развитых и доступных планарных технологий и не требует большого числа технологических операций. Согласно сравнительной таблице, даже без специального проведения оптимизации технологии создания разрабатываемый преобразователь свет-частота имеет меньшее энергопотребление и не критичные отличия основных рабочих параметров от параметров известных аналогов. Дальнейшие исследования влияния технологических аспектов могут позволить существенно улучшить характеристики прибора, а также, возможно, и уменьшить его габаритные размеры.

Кроме этого, по сравнению с существующими аналогами разрабатываемый однокристалльный преобразователь свет-частота имеет более широкие функциональные возможности, что расширяет спектр его применения.

Список литературы

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника: проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1987. 416 с.
2. Шука А.А. Функциональная электроника М.: МИРЭА, 1998. 259 с.
3. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов. Ч. 1. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. 199 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 416 с.
5. Электрофизические и фотоэлектрические свойства транзисторных структур с распределенным эмиттером и функциональные приборы на их основе / Б.С. Муравский

- [и др.] // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2000. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru>
6. Арсенид галлиевые ФПУ УФ-диапазона для многоспектральных оптоэлектронных систем / В.Н. Легкий [и др.] // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 112–115.
 7. Дворянкин В.Ф., Дикаев Ю.М., Кудряшов А.А. Исследование свойств фотовольтаических детекторов рентгеновского излучения на основе эпитаксиальных структур GaAs // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 6. С. 126–128.
 8. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Многочастотная генерация в параллельных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ»: сборник трудов конференции. СПб.: СПбГЭТУ, 2013. URL: <http://mwelectronics.ru/2013/>
 9. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ»: сборник трудов конференции, Т. 1. СПб.: ГЭТУ, 2012. С. 49–53.

Functional single-chip light-to-frequency converter based on high-resistivity *n*-GaAs

A.I. Mikhailov, A.V. Mitin, I.O. Kozhevnikov

The prototype of single-chip light-to-frequency converter is described. This converter is a mesa-planar photoresistor structure based on high-resistivity gallium arsenide with an N-shaped current-voltage characteristic. The converter functionality and utility for optoelectronics are showed. The main characteristics are indicated. The advantages and limitations of the proposed converter under the present analogs are analyzed.

Keywords: functional microelectronics, semi-insulating gallium arsenide, recombination current instability, photoelectric converters.

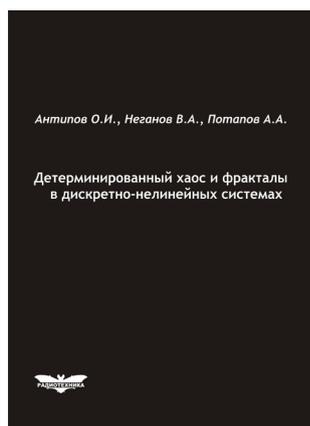
Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96



В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.