

Реконфигурируемая терагерцовая метаповерхность на основе интегрированных GaAs фотонных кристаллов и диодных микроключей

И.И. Беликов^{1,2}, А.Н. Приходько^{1,2,3}, А.С. Шураков^{1,2,4}, Г.Н. Гольцман^{1,2,3}

¹ Московский педагогический государственный университет

² Московский институт электроники и математики, НИУ «Высшая школа экономики»

³ Лаборатория квантовой фотоники, Российский квантовый центр

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Аннотация: в данной работе представлена конструкция реконфигурируемой метаповерхности диапазона 140-150 ГГц на основе интегрированных GaAs фотонных кристаллов и диодных микроключей. Описаны параметризованная модель элементарной ячейки и технология изготовления метаповерхности, содержащей 8×8 четвертьволновых элементов. Для случая засветки нормально падающим плоским волновым фронтом расчетный диапазон угловой развертки составил $40-54^\circ$ при ширине пучка $14-19^\circ$ с возможностью работы в проходящем и отраженном свете. Радиофизические параметры были дополнены измерениями потребляемой мощности и стабильности изготовленного прототипа при построчном переключении диодных микроключей с помощью транзисторной программируемой логической интегральной схемы с пользовательским цифровым интерфейсом и 50 МГц 2-канальным 14-битным цифро-аналоговым преобразователем. Анализ кривых дисперсии Аллана показал, что при временах интегрирования более 1 с данный способ даёт выигрыш за счёт снижения дрейфа и 1/ шума в сравнении с прецизионным и существенно более узкополосным источником-измерителем. При этом потребляемая мощность в рабочем режиме составила 13,7 мВт, что соответствует 219 мВт для метаповерхности аналогичной конструкции площадью $2,56 \text{ см}^2$.

Ключевые слова: реконфигурируемая интеллектуальная поверхность, терагерцовый диапазон, метаповерхность, фотонный кристалл, диод Шоттки, арсенид галлия

1. Введение

В настоящее время терагерцовые (ТГц) технологии находят всё большее применение в беспроводных системах связи нового поколения. Для развития и внедрения этих технологий необходимы устройства, обеспечивающие эффективную обработку и маршрутизацию сигнала на рабочих частотах выше 100 ГГц. В данной статье представлена реализация динамически реконфигурируемой интеллектуальной поверхности (RIS, от англ. Reconfigurable Intelligent Surface), использующей GaAs планарные диоды с барьером Шоттки (ДБШ) в качестве сосредоточенных активных элементов для 1-битной фазовой подстройки. Электромагнитный (ЭМ) дизайн RIS опирается на адаптацию разработанных нами ранее интегральных Si волноводных структур для ТГц спектрометра на чипе [1]. Основой устройства является четвертьволновая элементарная ячейка фотонного кристалла (ФК) GaAs, интегрированная с сужающейся целевой линией (СЦЛ) со встроенным диодным микроключом (ДМК). Такая элементарная ячейка может использоваться как часть реконфигурируемой метаповерхности для управления ТГц сигналом в отраженном и проходящем свете. Особенности процессов проектирования и изготовления, а также результаты характеризации прототипа 64-элементной метаповерхности представлены далее в тексте статьи.

2. Модель элементарной ячейки и конструкция метаповерхности

В данном разделе мы кратко описываем модель элементарной ячейки, предлагаемой к использованию в составе RIS [2] для маршрутизации сверхузких ТГц пучков в каналах беспроводной связи шестого поколения (6G). Данная модель является модификацией описанной нами ранее гибридной модели элементарной ячейки интеллектуальной отражающей поверхности с микроконтактами Шоттки [3]. Отличительной особенностью обновлённой версии является наличие в конструкции элементарной ячейки ФК GaAs, связанного с СЦЛ, в которую интегрирован ДМК. При анализе картины распределения ЭМ поля методом конечных элементов ДМК моделируется как прямоугольный сосредоточенный порт с заданным импедансом. Как показано на рис. 1, предложенная конструкция способна обеспечить отклонение от законов геометрической оптики при отражении и преломлении плоскопараллельного пучка. При этом углы отклонения, а также отражательная и пропускательная способности метаповерхности определяются как геометриями ФК и СЦЛ, так и транспортными параметрами ДМК на постоянном и переменном токе.

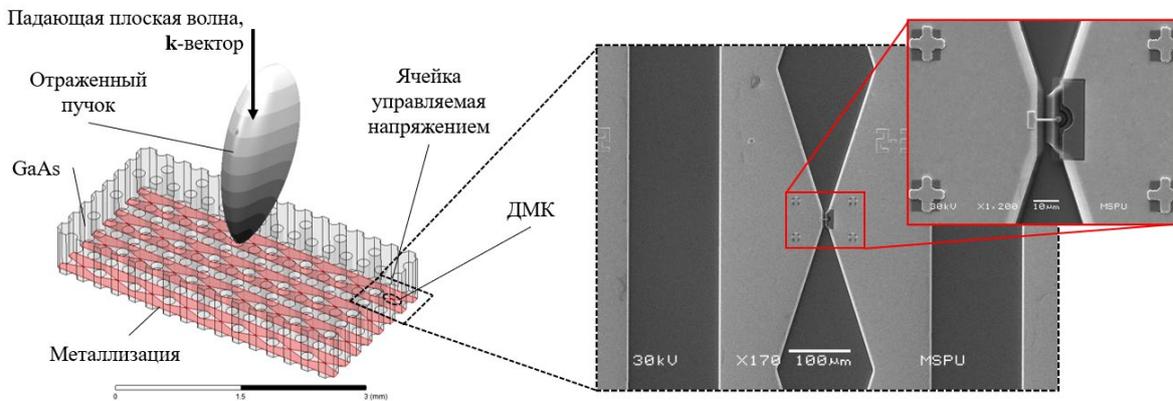


Рисунок 1. Параметризованная ЭМ модель метаповерхности с расчётным профилем отраженного пучка для несущей частоты 145 ГГц; СЭМ-изображение изготовленной СЦЛ со встроенным ДМК.

В качестве ДМК мы используем планарный ДБШ на основе гетероструктуры GaAs [4]. Его вольт-омную характеристику в явном виде можно описать с использованием W_0 -функции Ламберта [5] и решения уравнения Пуассона для заданного профиля легирования контактного слоя n-GaAs в соответствии с ур. 1:

$$\hat{Z}_{sq}(V_b) = \frac{1}{N_{sq}} \left[\left[\frac{d}{dV_b} \left(I_s \exp\left(\frac{V_b}{\eta V_t}\right) - I_s \right) + i\omega A \left(\frac{2(\psi_{bi} - V_b)}{q\epsilon N_d} \right)^{-0,5} + i\omega C_a \right]^{-1} + \hat{Z}_b + R_s \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \psi_{bi} = \eta V_t \ln\left(\frac{AA_R T^2}{I_s}\right) - (\eta - 2)V_t \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right)$$

Физические величины, входящие в ур. 1, представлены в таб. 1.

При смещении ДМК постоянным напряжением 0 В и 1 В его импеданс принимает значение $Z_{high} = 5 - 192i$ и $Z_{low} = 5 + 17.5i$ Ом соответственно. Такое изменение импеданса приводит к изменению коэффициентов отражения и передачи ЭМ волны, падающей на поверхность элементарной ячейки. Объединив фазовосконфигурированные ячейки в единую поверхность, можно реализовать управление направленностью пучка в отражённом и проходящем свете.

Таблица 1. Набор параметров, используемых для расчёта импеданса диодных микроключей

Обозначение	Физическая характеристика	Значение
Nsq	количество квадратов в одиночном элементе СЩЛ	0,375
V_b	напряжение смещения	[0 В, 1 В]
I_s	ток насыщения	13 нА
η	коэффициент неидеальности диода	1,5
V_t	тепловое напряжение	25,4 мВ
$\omega/2\pi$	рабочая частота	145 ГГц
A	площадь контакта Шоттки	0,785 мкм ²
q	заряд электрона	$1,6 \times 10^{-19}$ Кл
ϵ	диэлектрическая проницаемость GaAs	$11,4 \times 10^{-11}$
N_d	концентрация носителей слоя n-GaAs	$4,2 \times 10^{17}$ см ⁻³
C_a	шунтирующая ёмкость анода	3,3 фФ
Z_b	импеданс вывешенного анодного моста	17,5i Ом
R_s	общее сопротивление	5 Ом
A_R	постоянная Ричардсона	$8,16 \times 10^4$ А*см ⁻² *К ⁻²
N_c	температурно-зависимая плотность состояний уровня проводимости	$3,85 \times 10^{17}$ см ⁻³
T	рабочая температура	295 К

Для предложенной нами метаповерхности из 64 элементов [6] отраженный пучок будет отклоняться в диапазоне 40-54° в зависимости от состояния ДМК. Ширина пучка на уровне 3 дБ при этом составит 14-19°.

3. Макетирование и измерение характеристик метаповерхности

Технологический маршрут изготовления RIS представлен на рис. 2. Использованная пластина GaAs обладает трехслойной структурой n/n⁺/ПИ (0,19/20/630 мкм). Полуизолирующий (ПИ) слой выполняет роль подложки-носителя, на которой методом химического осаждения из газовой фазы создан проводящий слой с концентрацией мелкой примеси n⁺ = 5×10^{18} см⁻³ и приконтактный слой с концентрацией n = 4×10^{17} см⁻³. На первом этапе формировались знаки совмещения (не отображены на иллюстрациях) с дальнейшим созданием Ti/Pt/Au/n-GaAs контактов Шоттки. На следующем этапе в области вокруг контактов Шоттки создавалась защитная SiO₂ маска. Далее, в предварительно вытравленной области с использованием метода электронно-лучевого напыления и быстрого термического отжига формировались Ni/Ge/Au/Ni/Au омические контакты. Затем напылялась металлизация анодных мостиков, СЩЛ и подводящих контактов смещения по постоянному току. Заключительным шагом в создании ДМК являлось жидкостное травление проводящего слоя n⁺-GaAs, с формированием мез между выводными контактами диодов Шоттки. Получившаяся структура представляет собой массив СЩЛ с ДМК 8×8, где каждая строка имеет общий анодный и общий катодный контакт. Соответственно управление метаповерхностью осуществляется построчно. Отверстия в ПИ-GaAs для создания ФК изготавливаются в последнюю очередь методом лазерной абляции [6]. Перед его проведением была проведена первичная характеристика транспортных свойств прототипа на постоянном токе.

Изготовленная интегральная схема 64-элементной RIS с СЩЛ со встроенными ДМК была охарактеризована на предмет однородности и стабильности нелинейных элементов, уровня потребляемой мощности в рабочем режиме. Переключение из высокоомного и поддержание низкоомного состояний ДМК осуществлялось построчно с использованием платы с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС), оснащённой пользовательским цифровым интерфейсом и 2-канальным 14-битным цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП).

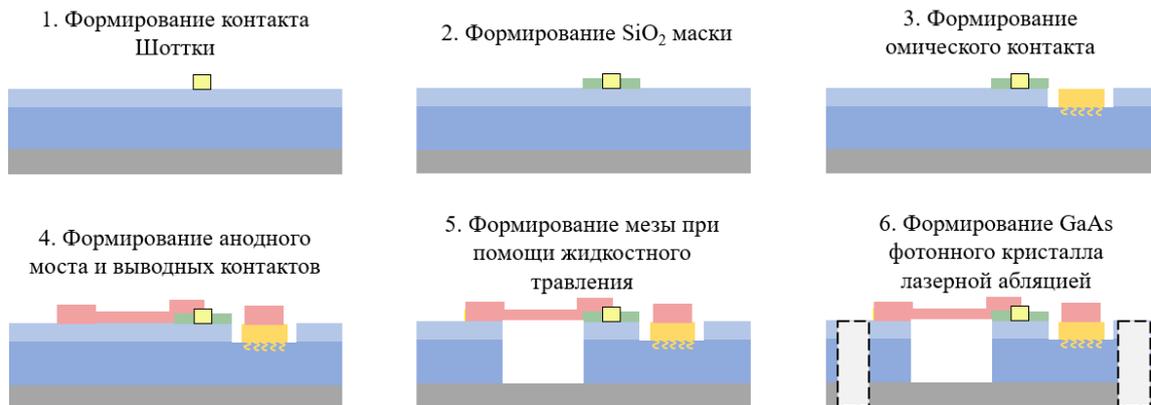


Рисунок 2. Маршрут изготовления RIS с СЦЛ со встроенными ДМК.

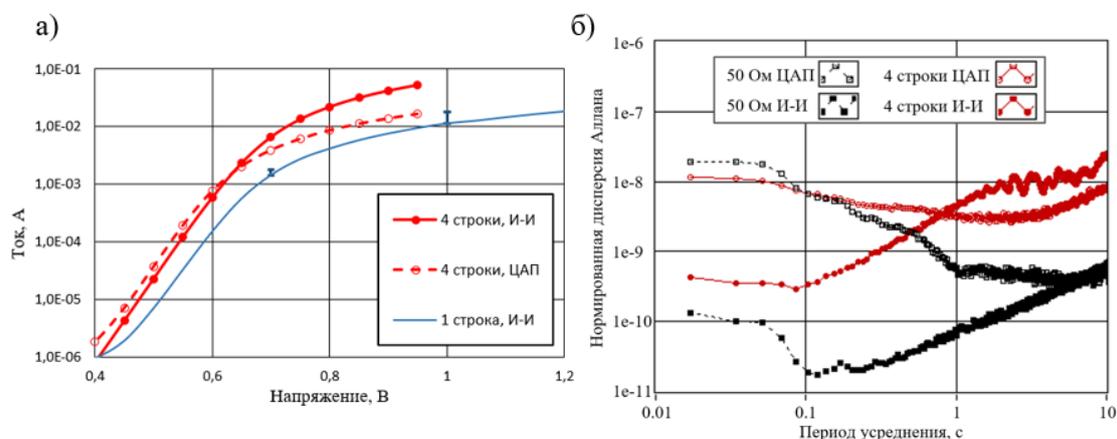


Рисунок 3. а) ВАХ строк RIS в различных конфигурациях смещения в полулогарифмическом масштабе; б) Кривые дисперсии Аллана для 50 Ом нагрузки и 4 строк RIS в логарифмическом масштабе.

Предварительно охарактеризованные по отдельности строки RIS 1, 2, 5, 6 были параллельно подключены к каналу 1 ЦАП. Тестирование и контроль состояний в строках RIS 3, 4, 7, 8 осуществлялись аналогичным образом с использованием канала 2 ЦАП. Съём тока осуществлялся через проходное сопротивление 10 Ом, напряжение на котором регистрировалось с помощью цифрового вольтметра. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) параллельно подключенных 4 строк RIS представлена на рис. 3(а) для описанного выше способа смещения постоянным током. Также, в целях сравнения приведены ВАХ 1 строки и описанных выше 4 строк RIS, полученные с помощью прецизионного источника-измерителя (И-И). На ВАХ 1 строки отображен 15% разброс значений тока для строк 1-8, связанный с различной длиной подводящих линий смещения. Разброс обозначен на графиках относительно первой строки для напряжений смещения 0,7 В и 1 В.

Рис. 3(б) содержит кривые дисперсии Аллана [7], позволяющие оценить вклад белого, 1/f и дрейфового шума в стабильность токовых параметров RIS в параллельных конфигурациях смещения, описанных выше, в сравнении с калиброванной нагрузкой 50 Ом. Учитывая, что стабильность радиофизических свойств RIS напрямую зависит от стабильности транспортного тока через встроенные в её строки ДМК, данный анализ является неотъемлемой частью процесса тестирования и отладки интегральной схемы. Сигнатура белого шума на временах интегрирования до 0,1 с присутствует на всех 4 кривых. При этом для ЦАП уровни

белого шума существенно выше, так как его аналоговая полоса 50 МГц существенно шире чем электроники И-И на основе операционных усилителей, для которых типичным быстродействием является 1 МГц при коэффициенте усиления равном 1. Более того, при временах интегрирования более 1 с использование ЦАП даёт выигрыш за счёт снижения дрейфа и $1/f$ шума в сравнении с И-И.

Потребляемая метаповерхностью мощность в режиме переключения при двухпозиционном диаграммообразовании составила 13,7 мВт для изготовленного 64-элементного устройства. При увеличении площади интегральной схемы RIS до практически обоснованных линейных размеров 2,56 см² и соответствующем увеличении числа элементов до 1024, суммарная потребляемая мощность в рабочем режиме должна составить 219 мВт. Эти значения находятся ниже, чем в современных интегральных схемах приемопередатчиков D-диапазона [8]. Мы уверены, что представленные результаты могут быть полезны разработчикам систем связи 6G.

4. Заключение

Мы создали параметризованную гибридную модель элементарной ячейки RIS с СЩЛ со встроенными ДМК. С ее помощью спроектировали 64-элементную конструкцию, обеспечивающую развертку пучка на 40-54° в отраженном и проходящем свете. Для случая плоского волнового фронта расчетная ширина пучка составила 14-19°. Построчный анализ ВАХ ДМК изготовленного прототипа показал высокую однородность на пластине при разбросе значений токов смещения не более 15% без учета калибровки на различие длин подводющих контактов. Потребляемая мощность при переключении в режиме двухпозиционного диаграммообразования составила 13,7 мВт, что является конкурентоспособным значением среди современных интегральных схем D-диапазона. Эффективность использования 50 МГц ПЛИС с прецизионным ЦАП была подтверждена по итогам анализа кривых дисперсии Аллана. Нормированные дисперсии транспортного тока при построчном переключении и параллельном соединении половины строк RIS составили 1×10^{-8} и 4×10^{-9} для времен интегрирования 20 мс и 1 с соответственно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10279).

Список литературы

1. Shurakov A. et al. Superconducting Electronic–Photonic Platform for HEB-Based Terahertz Spectrometers // *Appl. Sci.* MDPI, 2023. Vol. 13, № 10. P. 5892.
2. Chen Z. et al. Intelligent Reflecting Surface Assisted Terahertz Communications Toward 6G // *IEEE Wirel. Commun.* 2021. Vol. 28. P. 110–117.
3. Prikhodko A. et al. Unit cell model of a terahertz intelligent reflecting surface with Schottky microcontacts // *Proceedings of the 35th European Modeling & Simulation Symposium, EMSS.* CAL-TEK srl, 2023.
4. Shurakov A. et al. Planar Schottky diode with a Γ -shaped anode suspended bridge // *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing, 2020. Vol. 1695, № 1. P. 012154.
5. Prikhodko A. et al. Towards multipixel THz Schottky diode detector with a single RF output line // *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing, 2021. Vol. 2086, № 1. P. 012063.
6. S Shurakov A. et al. Wafer-Thick GaAs Photonic-Electronic Platform for Fast Terahertz Beam Steerers // *Prog. Electromagn. Res.* 2024. Принято к печати.
7. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // *Proc. IEEE.* 1966. Vol. 54, № 2. P. 221–230.
8. Carpenter S. et al. A fully integrated D-band direct-conversion I/Q transmitter and receiver chipset in SiGe BiCMOS technology // *J. Commun. Netw.* 2021. Vol. 23, № 2. P. 73–82.