Субтерагерцовый оптоэлектронный модулятор на основе перфорированного кремния

© П.В. Рожкова[1,2], А.Н. Приходько[1], П.И. Бондарева[1,2], Г.Н. Гольцман[1,2,3], А.С. Шураков[1]

[1] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
109028 Москва, Россия
[2] Московский педагогический государственный университет,
119435 Москва, Россия
[3] ООО „Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий“,
121205 Москва, Россия

E-mail: prozhkova@hse.ru

Поступила в Редакцию 15 июня 2026 г.
В окончательной редакции 9 августа 2026 г.
Принята к публикации 9 августа 2026 г.

В последние несколько десятилетий область применения субтерагерцовой техники существенно расширилась, включая сферы передачи информации и дистанционного зондирования, спектрального анализа и построения изображений. Использование фотонных интегральных схем на основе кремниевой платформы дает новые возможности для создания устройств управления амплитудой и фазой сигнала на частотах выше 100 ГГц. В данной статье мы описываем оптоэлектронный модулятор на основе перфорированного кремния для спектрального диапазона 130–160 ГГц. В работе представлены результаты расчета и измерения спектров пропускания модулятора для различных режимов работы.

Ключевые слова: кремний, фотонная интегральная схема, модуляция сигнала, субтерагерцовый диапазон.

DOI: 10.61011/FTP.2026.10.64215.10206

1. Введение

В последние несколько десятилетий область применения субтерагерцовой (суб-ТГц) техники существенно расширилась. В современных системах передачи информации и дистанционного зондирования, спектрального анализа и визуализации востребованы эффективные устройства управления амплитудой и фазой сигнала [1] в суб-ТГц диапазоне (100–300 ГГц). Фотонные интегральные схемы (ФИС) на основе кремния (Si) позволяют создавать сложные интегральные устройства с многочисленными пассивными и активными узлами, связанными через линии передачи со сверхнизкими потерями для реализации эффективной обработки суб-ТГц сигналов на чипе. ФИС Si-модуляторов используют эффект дисперсии свободных носителей (плазменный дисперсионный эффект) для изменения показателя преломления при управлении спектром пропускания и (или) отражения в заданной полосе частот. В качестве архитектуры суб-ТГц волноводов со сверхнизкими потерями особый интерес представляют перфорированные Si-структуры [2,3]. Действительно, правильный выбор формы и положения перфораций позволяет эффективно управлять дисперсией, локализуя суб-ТГц моду и минимизируя паразитное излучение за пределы сердцевины волновода. Локальная оптическая генерация носителей в кремнии позволяет эффективно управлять радиофизическими свойствами структуры, обеспечивая при этом глубокую модуляцию сигнала. Возбуждение генерирует электронно-дырочную плазму в объеме Si, что меняет его проводимость. Критически важной задачей остается точный учет вносимых потерь и динамики свободных носителей для предотвращения деградации свойств модулированного суб-ТГц сигнала.

В данной работе мы описываем оптоэлектронный модулятор на основе перфорированного Si для спектрального диапазона 130–160 ГГц. В работе представлены результаты расчета и измерения спектров пропускания модулятора для различных режимов работы. Конструкция модулятора предусматривает возможность полностью Si исполнения ФИС, а также включения в нее преобразователя мод на основе металлической щелевой линии с переменным импедансом. При этом достигнута более широкая полоса рабочих частот, чем мы ранее сообщали в работе [4].

В основе ФИС, представленной на рис. 1, *a*, лежит следующая геометрия. Широкоугольные ответвления V-образного соединителя выходят за пределы сердцевины и поддерживаются решеткой эффективной среды, окружающей сердцевину. Сердцевина волновода линейно расширяется от 586.2 до 834.1 мкм вблизи щели, что снижает локализацию поля в диэлектрике и обеспечивает его эффективный переход в щелевую линию.

Как показано на рис. 1, *b*, линейное расширение структуры происходит под углом $\theta = 25^\circ$. За пределами этой области граница проводника располагается над сердцевиной волновода. Отсутствие решетки в данной зоне позволяет реализовать квадратичный изгиб границ расширяющихся плеч в две параллельные линии, формируя щелевой участок шириной 11.7 мкм. Внутренний край V-образного соединителя фиксируется с помощью

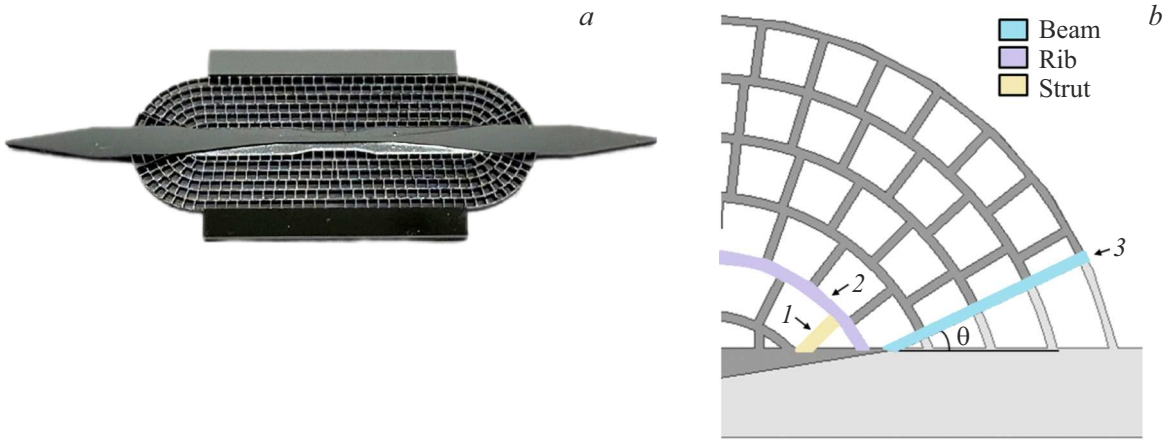

Рис. 1. Оптоэлектронный модулятор на кремнии с апериодической решеткой: *a* — изготовленная структура и *b* — выноска со структурными элементами, где *1* — распорка, *2* — ребро, *3* — балка, θ — угол линейного расширения.

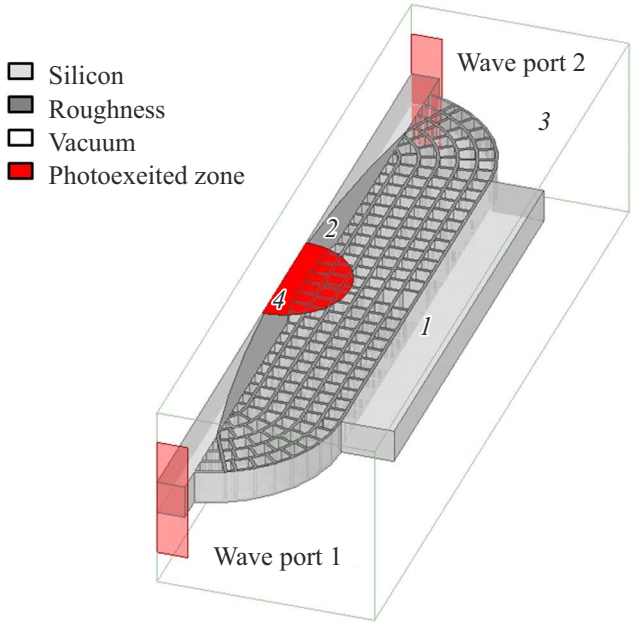

Рис. 2. Трехмерная электромагнитная модель: *1* — кремний, *2* — шероховатая поверхность кремния, *3* — вакуум, *4* — зона фотовозбуждения структуры.

радиально-ориентированной опорной балки, которая пересекает каждое из ребер структуры строго под углом 90°. Геометрические параметры элементов решетки фиксированы: ширина балки, ребер и распорок — 44 мкм, радиальный шаг (расстояние между последовательными ребрами и среднее расстояние между соседними распорками) — 237.4 мкм.

Изготовленный кремниевый оптоэлектронный модулятор и его трехмерная (3D) электромагнитная (ЭМ) модель представлены на рис. 1 и 2.

Моделирование процессов фотовозбуждения в полупроводниковой структуре основывается на модели Друде [5]. При высокоэнергетическом лазерном возбуждении, где энергия падающих фотонов превышает ширину энергетического зазора полупроводника, образуется неравновесное состояние на поверхности полупроводника. Часть электронов из валентной зоны будет переходить в зону проводимости, в то время как в валентной зоне будет генерироваться такое же количество дырок, образуя электронно-дырочные пары. Концентрация фотосгенерированных носителей будет пропорциональна интенсивности падающего излучения. Помимо этого, будет возрастать и плазменная частота, которая ведет к изменению комплексной диэлектрической постоянной, а также проводимости фотовозбужденного участка полупроводника. Проводимость в свою очередь меняет импеданс засвеченного участка, уменьшая амплитуду прошедшей волны и тем самым осуществляя модуляцию.

Толщина кремниевой волноводной структуры в составе разработанного модулятора составляет 450 мкм. Засветка ее центральной области лазерным излучением осуществляется вдоль нормали к поверхности на длине волны 655 нм. Для корректного численного расчета волноводной структуры с помощью ЭМ моделирования были заданы следующие параметры. Для высокоомного кремния с удельным сопротивлением $1 \cdot 10^4$ Ом · см проводимость составляет 0.01 См/м. Значение тангенса угла диэлектрических потерь задано как $1.5 \cdot 10^5$. Радиус лазерного пучка равен 1 мм. Расчетная фотопроводимость кремния составляет 3000 См/м [6], а удельное сопротивление равно 167 Ом/□. Область фотовозбуждения моделируется как круг с заданным поверхностным импедансом для случая полностью кремниевой конструкции модулятора. Действительно, при коэффициенте поглощения кремния 2878 $см^{-1}$ на целевой длине волны глубина проникновения света оценивается в 3.5 мкм. Интенсивность света экспоненциально уменьшается при распространении вглубь от поверхности засветки в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера. Область

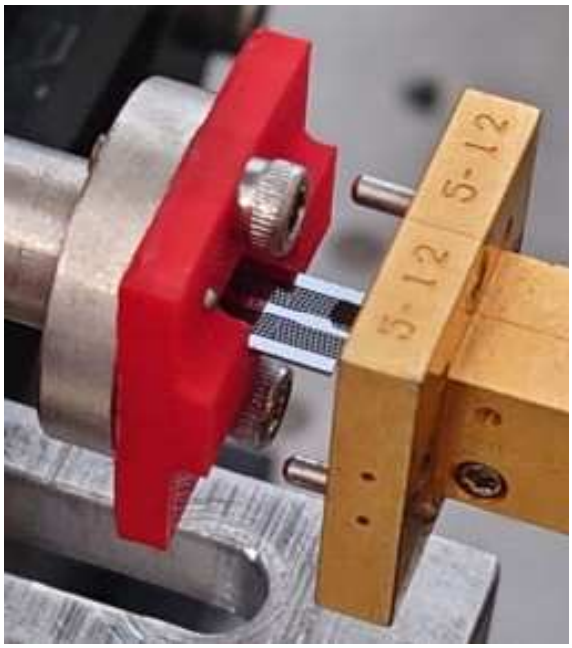

Рис. 3. Изготовленная структура, установленная в держатель.

эффективного поглощения и, как следствие, генерация неравновесных электронно-дырочных пар локализована в приповерхностном слое кремниевой волноводной структуры. ЭМ модель представлена на рис. 2.

Для верификации разработанной ЭМ модели и повышения достоверности сравнительного анализа с экспериментальными данными изготовленного образца в свойства материалов были внесены технологически обусловленные корректировки. В частности, реальная шероховатость поверхности изготовленной структуры, составляющая 70 нм, была учтена в симуляции через задание эквивалентной конечной проводимости материала.

Технологический цикл изготовления модулятора включает в себя лазерную литографию с последующим проявлением в водном растворе гидроксида калия (KOH), терморезистивное напыление тонкой пленки алюминия толщиной 50–100 нм и процесс взрывной литографии в ацетоне. На финальной стадии формирования рельефа ФИС применяется глубокое реактивное ионное травление.

Изготовленный образец модулятора был интегрирован в измерительный стенд для исследования его оптоэлектронных характеристик в суб-ТГц диапазоне. В качестве источника излучения в измерительной схеме применяется микроволновый синтезатор, нагруженный 12-кратным умножителем частоты. Исследуемая кремниевая структура закреплена в специализированном держателе, изготовленном методом 3D печати, как показано на рис 3. Для согласования волноводного тракта стандарта WR-6 с рабочим диапазоном 110–170 ГГц используется клиновидный преобразователь мод. Для точного совмещения сечений волноводов используются фланцевые соединения стандарта UG-387, снабженные направляющими штифтами. Выходной сигнал поступает в измеритель мощности и далее считывается системой сбора данных. Для обеспечения оптического возбуждения над структурой ортогонально в штативе позиционировался лазер, подключенный к источнику питания с напряжением 12 В. Юстировка лазера обеспечивает точную засветку центра щелевой линии. Длина волны — 655 нм, мощность — 5 мВт, диаметр пучка — 2 мм. Расстояние от торца оптоволокна до поверхности ФИС составляет 8 мм.

Для оценки вносимых потерь структуры был проведен сравнительный анализ матриц параметров рассеяния (S-параметров) для изготовленного образца и ЭМ модели. На рис. 4, *a* представлены экспериментальные и расчетные частотные зависимости коэффициента передачи исследуемой кремниевой структуры в диапазоне частот от 132 до 162 ГГц. Сравнение графиков позволяет оценить характер влияния оптического возбуждения на диэлектрические свойства полупроводника и подтвердить эффективность модуляции терагерцового излучения. В отсутствие внешнего оптического воздействия исследуемая ФИС характеризуется высокой прозрачностью в исследуемом диапазоне. Теоретическая модель прогнозирует высокую пропускную способность в широкой полосе суб-ТГц частот с минимальными вносимыми потерями в пределах от -1 до -3 дБ, сопровождающуюся незначительными неоднородностями. Экспериментально полученный спектр качественно согласуется с результатами численного моделирования, демонстрируя средний уровень пропускной способности в диапазоне от -3 до -7 дБ. В эксперименте наблюдается некоторое дополнительное затухание сигнала и наличие выраженных локальных минимумов на частотах 133, 149 и 153 ГГц. Они могут быть обусловлены шероховатостью, которая понижает эффективность фотовозбуждения оптическим лазером.

Приложение внешнего оптического излучения и перевод структуры в состояние фотовозбуждения приводит к резкому падению уровня пропускания во всей анализируемой частотной полосе. Экспериментальная кривая повторяет общую тенденцию модели, однако имеет более сглаженный характер с максимальным подавлением сигнала до -28 дБ вблизи 147 ГГц. Экспериментально наблюдаемая глубина модуляции терагерцового сигнала при переходе из нефотовозбужденного состояния в фотовозбужденное состояние находится диапазоне 11.4–25.4 дБ, что подтверждает высокую эффективность исследуемой структуры для создания оптически управляемых элементов ТГц фотоники. Расчетная максимальная глубина модуляции составляет 37.7 дБ на частоте 160 ГГц, а минимальная — 15.4 дБ на частоте 130 ГГц.

С целью дальнейшего улучшения характеристик устройства, обеспечения частотно-селективного отклика и интеграции с полупроводниковыми нелинейными элементами была разработана численная ЭМ модель модифицированной структуры. В данной конструкции моду-

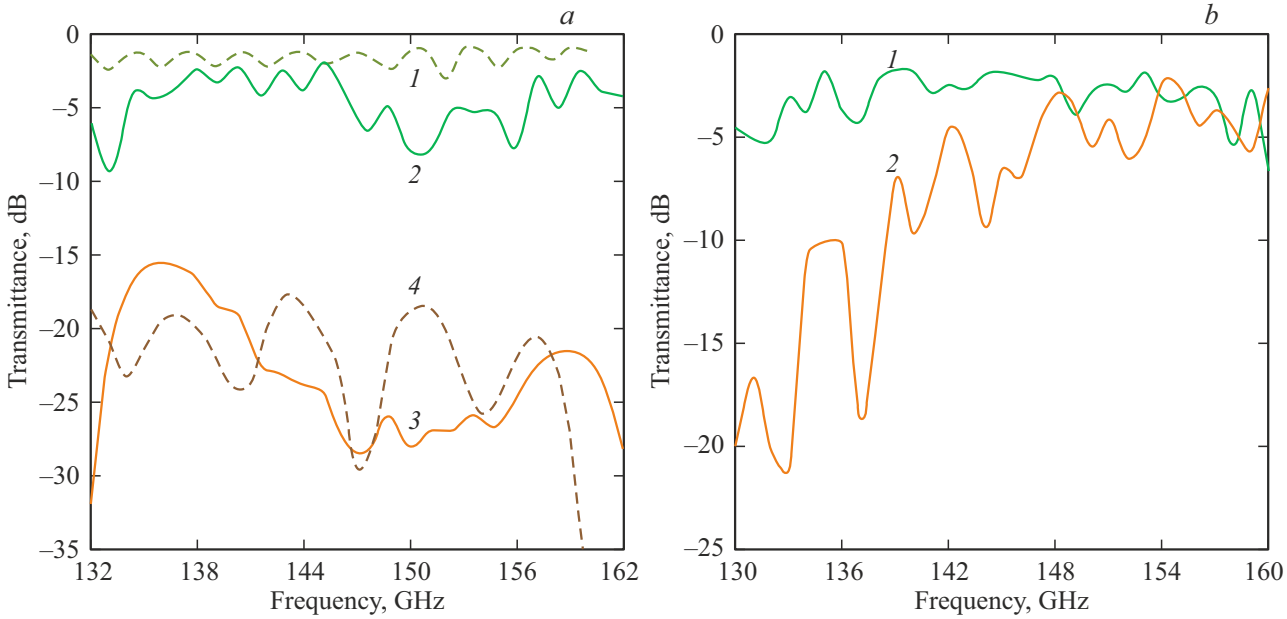

Рис. 4. Сравнительный анализ спектров пропускания измеренной кремниевой структуры с расчетными. *a*) спектры без металлизации: *1* — без фотовозбуждения, расчетный; *2* — без фотовозбуждения, измеренный; *3* — с фотовозбуждением, расчетный; *4* — с фотовозбуждением, измеренный; *b*) спектры с металлизацией: *1* — без фотовозбуждения, расчетный, *2* — с фотовозбуждением, расчетный.

лятора поверх сформированного кремниевого рельефа (см. рис. 2) наносится слой металла, формирующий планарную топологию проводящей щели. Она локализована на кремниевой волноводной структуре, образуя распределенную линию передачи (с преобразованием мод) и смещения нелинейного элемента с низким паразитным сопротивлением. Зазор между плечами щелевой линии в области фотовозбуждения моделируется как сосредоточенный порт с заданным импедансом. На рис. 4 предоставлен сравнительный анализ двух расчетных состояний модифицированной структуры. Первое состояние — это состояние без фотовозбуждения полупроводника. Моделирование показывает, что металлизированная апериодическая решетка приобретает свойства полосового ТГц фильтра. В высокочастотной области исследуемого диапазона от 148 до 160 ГГц структура обладает высокой прозрачностью со стабильным уровнем пропускания в пределах от −1.8 до −4 дБ. В низкочастотной области 130–140 ГГц наблюдается спад пропускной способности до −5 дБ с локальным минимумом вблизи 131 ГГц, что обусловлено частотной селективностью самой металлической сетки.

При добавлении фотовозбуждения генерация фотоносителей в кремнии приводит к изменению спектрального отклика. Наиболее выраженное падение пропускной способности фиксируется в полосе частот от 130 до 145 ГГц, где расчетный уровень сигнала опускается до локальных минимумов −21.3 и −18.5 дБ на частотах 133 и 137 ГГц соответственно. На более высоких частотах 150–160 ГГц влияние фотовозбуждения минимизируется, и кривые практически сливаются.

Полностью Si ФИС обеспечивает широкополосную амплитудную модуляцию во всем диапазоне от 132 до 162 ГГц. В свою очередь интеграция металлической сетки добавляет частотную селективность. Для структуры без металлизации экспериментальная глубина модуляции достигает максимума −25.4 дБ в широком диапазоне частот. Для металлизированной структуры максимальный контраст локализован в полосе 130–145 ГГц и составляет в среднем 15–18 дБ.

Таким образом, если пластина высокоомного кремния подходит для создания простых широкополосных ТГц модуляторов, то нанесение металлизации дает возможность проектирования более сложных, частотно-зависимых устройств ТГц фотоники, способных осуществлять селективную фильтрацию и модуляцию сигналов в заданных частотных каналах. Последний вариант структуры устройства может быть эффективно интегрирован с полупроводниковыми нелинейными элементами, повышая быстродействие и обеспечивая несколько модуляционных состояний.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках Программы развития НИУ ВШЭ на 2025–2036 гг., а также в рамках Программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“ национального проекта „Молодежь и дети“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Alkhlefat, M.A. Esmail, A.M. Ragheb, S.M. Idrus, F.M. Iqbal, S.A. Alshebeili. IEEE Access, **12**, 133521 (2024). DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3460671
[2] J. Li, K.D. Xu, M. Guo, L. Zhong, Z. Huang, Z. Wu. Adv. Optical Mater., **14** (21), e71287 (2026). DOI: 10.1002/adom.71287
[3] K. Tsuruda, M. Fujita, T. Nagatsuma. Opt. Express, **23** (25), 31977 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.031977
[4] A. Shurakov, I. Belikov, A. Prikhodko, M. Ershova, G. Goltsman. Appl. Sci., **13** (10), 5892 (2023). DOI: 10.3390/app13105892
[5] C. Zhao, D. Wang, S. Lin, J. Zhao, Y. Wang, L. Rong. Photonics, **11** (3), 202 (2024). DOI: 10.3390/photonics11030202
[6] K. Sasao, Y. Monnai. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **10** (3), 256 (2020). DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2977991

Редактор Г.А. Оганесян

Sub-terahertz optoelectronic modulator based on perforated silicon

P.V. Rozhkova[1,2], *A.N. Prikhodko*[1], *P.I. Bondareva*[1,2], *G.N. Goltsman*[1,2,3], *A.S. Shurakov*[1]

[1] National Research University Higher school of Economics,
109028 Moscow Russia
[2] Moscow Pedagogical State University,
119435 Moscow, Russia
[3] International Center for Quantum Optics and Quantum Technologies LLC,
121205 Moscow, Russia

Abstract In recent decades, the scope of sub-terahertz technology applications has significantly expanded. As operating frequencies increase, there arises a growing demand for devices capable of high-frequency signal processing without substantial degradation, characterized by minimal transmission losses, as well as the ability to convert optical signals and perform amplitude-phase modulation. In this context, sub-terahertz photonic integrated circuits are highly sought after, as they enable an efficient transition from conventional electronics to optoelectronics. In this paper, we report on an optoelectronic modulator based on a silicon waveguide operating in the 130–160 GHz frequency range.