

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Сопко Ивана Миклошовича «Акустооптическое взаимодействие инфракрасного излучения в металл-диэлектрических структурах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Диссертационная работа И.М. Сопко посвящена разработке высокоэффективных акустооптических устройств управления излучением среднего и дальнего инфракрасного диапазона.

Создание акустооптических устройств дальнего инфракрасного и терагерцового диапазонов осложняется рядом фундаментальных и технических проблем. Основная проблема заключается в том, что эффективность взаимодействия обратно пропорционально квадрату длины волны излучения. Материалы, обладающие высоким акустооптическими свойствами, непрозрачны в дальнем инфракрасном диапазоне. В рамках данной работы рассматриваются различные подходы для повышения эффективности взаимодействия инфракрасного излучения на длине волны 10,6 мкм с акустической волной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы. Список литературы включает в себя 81 работу. Объем диссертации составляет 109 страниц и включает в себя 31 рисунок и 4 таблицы.

Во **введении** рассматриваются актуальность и разработанность темы исследования данной диссертационной работы, её новизна, а также научная и практическая значимость, устанавливаются цели и задачи проводимого исследования, определяются объект, предмет и методология исследования. Представлен обзор современного положения дел в сфере акустооптических приборов и методов в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах.

В **первой главе** диссертации рассматриваются вопросы акустооптического взаимодействия и возможность его усиления методами акустоплазмоники. Описаны проблемы акустооптики инфракрасного диапазона и обзревается различные подходы к их решениям: поискам новых инфракрасных оптических материалов и применение нестандартных конструкций и структур. Приводится обзор применений методов плазмоники в акустооптике. Так как акустические волны способны влиять на условие согласования плазмон-поляритонов с объемным излучением, в итоге получается система из трех взаимосвязанных явлений: распространение света, распространение звука и распространение плазмонов.

Во **второй главе** диссертации описаны оптические особенности поверхностного плазмон-поляритона инфракрасного диапазона. анализируется влияние призмы при возбуждении поверхностного плазмона в геометрии Отто при угле падения, превышающим предельный угол полного внутреннего отражения в случае металлической подложки. Описаны особенности поверхностных плазмонов при переходе в инфракрасный диапазон: многократное увеличение длины распространения, а также иной характер локализации. Показана возможность использования многослойных полностью диэлектрических структур(как для ТМ, так и для ТЕ поляризации). Сверхузкие формы резонансов в полностью диэлектрических структурах

позволяют получить высокую эффективность, однако накладывают серьезные ограничения на максимальный угловой спектр падающего излучения.

**В третьей главе** диссертации рассматривается вопрос акустоплазменной модуляции инфракрасного излучения. Предложен механизм модуляции излучения при призмном методе ввода излучения в геометрии Отто с помощью акустической волны посредством упрогооптического эффекта и изменению величины зазора между структурой и призмой. Произведены расчеты параметров акустической волны Рэлея на поверхности призмы. Установлено, что источнику звука мощностью в 1 Вт соответствует глубина модуляции показателя преломления порядка  $10^{-4}$  и амплитуда гофра около 10 нанометров. Рассмотрена возможность акустически управлять призмным возбуждением волноводной моды в планарной полупроводниковой структуре с помощью продольной акустической волны. Рассчитывались 4 структуры: на основе полубесконечного слоя карбида кремния, карбида кремния с подложкой и полностью диэлектрические волноводы для ТЕ и ТМ поляризации. Представлены результаты по форме резонанса поглощения, а также величины модуляции. Проведен анализ пределов частот работы модулятора, вызванных различными факторами.

**В четвертой главе** диссертации рассматривается вопрос об усилении оптоакустического взаимодействия с использованием механизма электрострикции в слоистых средах. Проведено сравнение такого метода преобразования с широко используемым тепловым преобразованием на основе тонкой металлической пленки. Показано, что вклад электрострикционного механизма существенно слабее, если используется однородная среда. Продемонстрирована возможность усиления генерируемого акустического сигнала за счет возбуждения волноводных мод, энергия которых сосредоточена в узком, порядка 200-400 нм, слое диэлектрика. За счет высокой локализации энергии электромагнитного поля в структуре локальные значения интенсивности увеличиваются более чем на два порядка по сравнению с интенсивностью падающего света, что позволяет увеличить амплитуду создаваемого давления также на два порядка величины по сравнению со случаем взаимодействия света с однородной средой. Таким образом, в работе впервые предложены слоистые диэлектрические структуры, в которых эффект электрострикции возникает за счёт возбуждения волноводных мод.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, хорошо апробирована публикациями в авторитетных журналах и докладами на известных международных конференциях.

Результаты диссертации обладают **новизной**. Так, впервые рассмотрена методика использования эванесцентных волн в многослойных диэлектрических структурах и поверхностных плазмон-поляритонов в металл-диэлектрических структурах для увеличения эффективности акустооптического взаимодействия в инфракрасной области спектра. Впервые проанализированы конфигурации для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов на поверхности металлов и поверхностных фонон-поляритонов на границе поглощающих полупроводников для создания акустофотонных устройств.

**Достоверность** и обоснованность представленных в работе результатов подтверждается логичностью и обоснованностью используемых математических

выкладок и физических моделей, а также согласованностью результатов расчетов с результатами экспериментов и теоретических расчетах, полученными в работах других авторов.

При всей высокой оценке диссертации необходимо отметить, что она не лишена недостатков.

1. Замечания по поводу указанной соискателем научной новизны работы:

1) пункт 1: «Впервые рассмотрена методика ...»

Новизны в рассмотрении нет. Возможно, автор имел ввиду другой термин.

2) пункт 4: «... за счет модуляции центрального слоя в структуре Ge-воздух-Al ...»

Центральный слой в указанной структуре – это воздух. Здесь нужно было уточнить, какой именно параметр слоя был модулирован.

3) в пункте 1 научной новизны говорится, что использование поверхностных плазмон-поляритонов в металл-диэлектрических структурах позволит увеличить эффективность акустооптического взаимодействия в инфракрасной области спектра. В то же время в тексте рукописи диссертации нигде не дано численной оценки выигрыша за счёт использования поверхностных плазмон-поляритонов.

2. Замечания по поводу положений, выносимых на защиту:

пункт 3: «В среднем ИК-диапазоне длина пробега плазмонов на поверхности металлов имеет величину порядка сантиметров».

Это – общеизвестный факт, которые приводится, например, в работе [1].

3. Замечания по тексту диссертационной работы:

1) Необходимо дать интерпретацию двух резонансов поглощения для ТЕ-волны при использовании системы призма-воздух-Ge-CdTe-подложка. (с.45, рис. 11а). Оценить возможность их практического применения.

2) В разделе 3.2 для численной оценки основных параметров автор использует частоту 3,5 МГц. В этом случае, согласно Таблице 3, длина релеевской ультразвуковой волны составляет около 1 мм. Диаметр же пучка излучения СО<sub>2</sub> лазера составляет порядка 6 мм. В данном случае нельзя считать, что величина зазора является постоянной по всему сечению пучка излучения. Поэтому рисунки 14, 15 и 16 показывают лишь максимальное значение для локальной модуляции коэффициента отражения. Учёт неоднородности толщины зазора, который автор справедливо называет «гофром», должен привести к уменьшению интегрального значения модуляции коэффициента отражения. Таким образом, этот раздел целесообразно было дополнить корректными численными оценками, которые будут полезны при постановке реального эксперимента.

3) Как известно, пучок лазерного излучения характеризуется дифракционной расходимостью. В то же время, поверхностный плазмонный резонанс, как правило, достаточно узкий. Поэтому в тексте диссертационной работы необходимо было дать численную оценку влияния расходимости излучения СО<sub>2</sub> лазера (около 5 миллирадиан или 0,3°) на глубину акустоплазмонной модуляции коэффициента отражения.

[1] Nobuyoshi H. et al. // Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 120. – Art.n. 173103. – DOI: 10.1063/1.4966934.

Указанные замечания не отражаются на общем восприятии диссертации и не снижают заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки.

На основании вышеизложенного можно заключить, что научные результаты, представленные в диссертации, вносят достойный вклад в развитие АО приборов, пригодных для использования в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Общее впечатление о диссертационной работе И.М. Сопко положительное. Автор работы продемонстрировал понимание изучаемых явлений и знание темы исследования. Диссертация «Акустооптическое взаимодействие инфракрасного излучения в металл-диэлектрических структурах» соответствует специальности 1.3.4. «Радиофизика» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — Сопко Иван Миклошович — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. «Радиофизика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела акустооптических информационных систем (НИО-2) Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН).

Никитин Павел Алексеевич

Подпись

Дата: 27.10.2022

117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15

Телефон: +7 (495) 333-50-81, e-mail: nikitin.pa@ntcup.ru

Подпись П.А. Никитина подтверждаю:

Зам. директора по научной работе

Чуриков Дмитрий Викторович

Подпись

Дата: 27.10.2022