

УДК 535-14;537.67

## ГИГАГЕРЦОВЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ОТКЛИК И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ КИРАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ И МЕТАСТРУКТУР С CdS, CdSe, GaAs, Si

© 2026 г. Г. А. Крафтмахер<sup>а,\*</sup>, В. С. Бутылкин<sup>а,\*\*</sup>, П. С. Фишер<sup>а,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, 141190 Россия

\*e-mail: gaarkr139@mail.ru

\*\*e-mail: vasebut@yandex.ru

\*\*\*e-mail: fisherps@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2025 г.

После доработки 28.01.2026 г.

Принята к публикации 28.01.2026 г.

В условиях свободного пространства в диапазоне 3–12 ГГц исследована трансформация резонансных откликов киральных метаструктур и метаповерхностей с полупроводниковыми включениями при фотовозбуждении. Применены цепочки мета-атомов (планарных электропроводящих киральных кольцевых элементов с разрывами, нагруженными CdS-, CdSe-включениями). Обнаружено, что при изменении мощности оптического излучения  $P_\lambda = 0–250$  мВт ( $\lambda = 0.97$  мкм), направляемого оптоволоком в область определенного разрыва, в спектре коэффициента прохождения гигагерцовых волн происходит плавная селективная трансформация соответствующего резонансного отклика без изменения резонансных откликов других элементов в зависимости от геометрии и вида метаструктуры. Также были исследованы цилиндрические образцы на основе киральных многозаходных медных спиралей с полупроводниковыми сердечниками GaAs, Si: метадиполи (мини-резонаторы). Исследуемые структуры могут быть полезны для применений в управляемых фильтрах и антеннах; для экспресс-тестов, востребованных развитием новых технологий и разнообразием полупроводников.

**Ключевые слова:** гигагерцовый диапазон, метаструктура, кольцевые элементы с разрывами, многозаходные медные спирали, CdS, CdSe, Si, GaAs-включения, фотовозбуждение, волоконно-лазерное облучение, фильтрация гигагерцовых волн.

**DOI:** 10.7868/S3034573126020069

### ВВЕДЕНИЕ

Известные в оптическом диапазоне киральные объекты, такие как ДНК, белки-коллагены, в молекулах которых расположение атомов имеет вид спиральных цепочек, получили развитие в микроволновом диапазоне при создании киральных метаматериалов. Интерес к ним сохраняется в настоящее время [1, 2], так как они позволяют достаточно простыми средствами в широком диапазоне частот формировать разные электромагнитные свойства, обусловленные не химическим составом, а геометрией, и управлять ими, поскольку совместимы с элементами электриче-

ского (варакторы) [3], магнитного (объединение с ферритами) [4–6] и оптического (полупроводниковые включения) [7–12] управления.

Оптическое управление, наиболее востребованное в настоящее время, обеспечивает низкую чувствительность к электромагнитным помехам, хорошую развязку между каналами сигнала и управления, быстроедействие и, самое главное, возможность волоконно-оптического адресного воздействия на интенсивность резонансов отдельных элементов в широком диапазоне частот микроволнового и терагерцового диапазонов.

Практическое применение метаструктур, мета-атомов и мета-поверхностей в СВЧ-диапазоне связывают с перестраиваемыми фильтрами и антеннами [13–17]. Как правило, используются базовые полупроводники, такие как, кремний, арсенид галлия, германий, которые нашли применение во многих устройствах микроэлектроники.

В работе [12] впервые в гигагерцовом диапазоне применены CdS- и CdSe-включения в метаструктурах на основе резонансных проводов и в планарных киральных кольцевых элементах с разрывами; исследована в волноводе и мета-интерферометре динамика частотных зависимостей коэффициента прохождения с метаструктурами при однофотонном фотовозбуждении CdS и CdSe (0.53 мкм) и двухфотонном (0.97 мкм).

В источнике [18] впервые предложены оптически-управляемые мини-резонаторы (метадиполи) в виде цилиндрических образцов на основе многозаходной киральной спирали с GaAs-сердечником и в [19] оптически- и магнитоуправляемые метадиполи на СВЧ на основе медной многозаходной киральной спирали, содержащей спаренные сердечники – GaAs, как элемент оптического управления и железиттриевый феррит в качестве элемента магнитного управления.

Для развития элементной базы в микроэлектронике, связанной с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью волн микроволнового диапазона, представляют интерес новые структуры, изучение их функциональных возможностей и методов управления, учитывая зависимость от геометрии и разнообразия полупроводников, что является стимулом и целью для исследований в данной работе. В работе экспериментально исследуются функциональные особенности гигагерцовых резонансных откликов с цепочками планарных кольцевых элементов с CdS, CdSe в разрывах, и с цилиндрическими образцами на основе киральных многозаходных медных спиралей (метадиполи-минирезонаторы) с GaAs, Si-сердечниками. Предлагается использовать минирезонаторы для экспресс-тестов, характеризующих поведение резонансного отклика полупроводников разных типов, с малыми размерами, в зависимости от технологий.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовали гигагерцовые резонансные отклики метаструктур, которые зависят от их геометрии, свойств фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводников и от связи структуры с волноводом.

Мы измеряли динамику частотных зависимостей коэффициента прохождения  $T$ , дБ при фотовозбуждении полупроводниковых включений в диапазоне 3–6 ГГц с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-58 при расположении структур в свободном пространстве в разрыве прямоугольных волноводов (сечение  $48 \times 24$  мм), а также с панорамным измерителем КСВН Р2-61 в диапазоне 8–12 ГГц (сечение волноводов  $23 \times 11$  мм). Для управления динамикой прохождения микроволн применяли волоконно-оптическое облучение лазерным диодом мощностью  $P_\lambda = 0–1000$  Вт в непрерывном режиме ( $\lambda = 0.97$  мкм). Подводили оптоволокно (диаметр 110 мкм) перпендикулярно поверхности полупроводника на расстоянии приблизительно нескольких миллиметров.

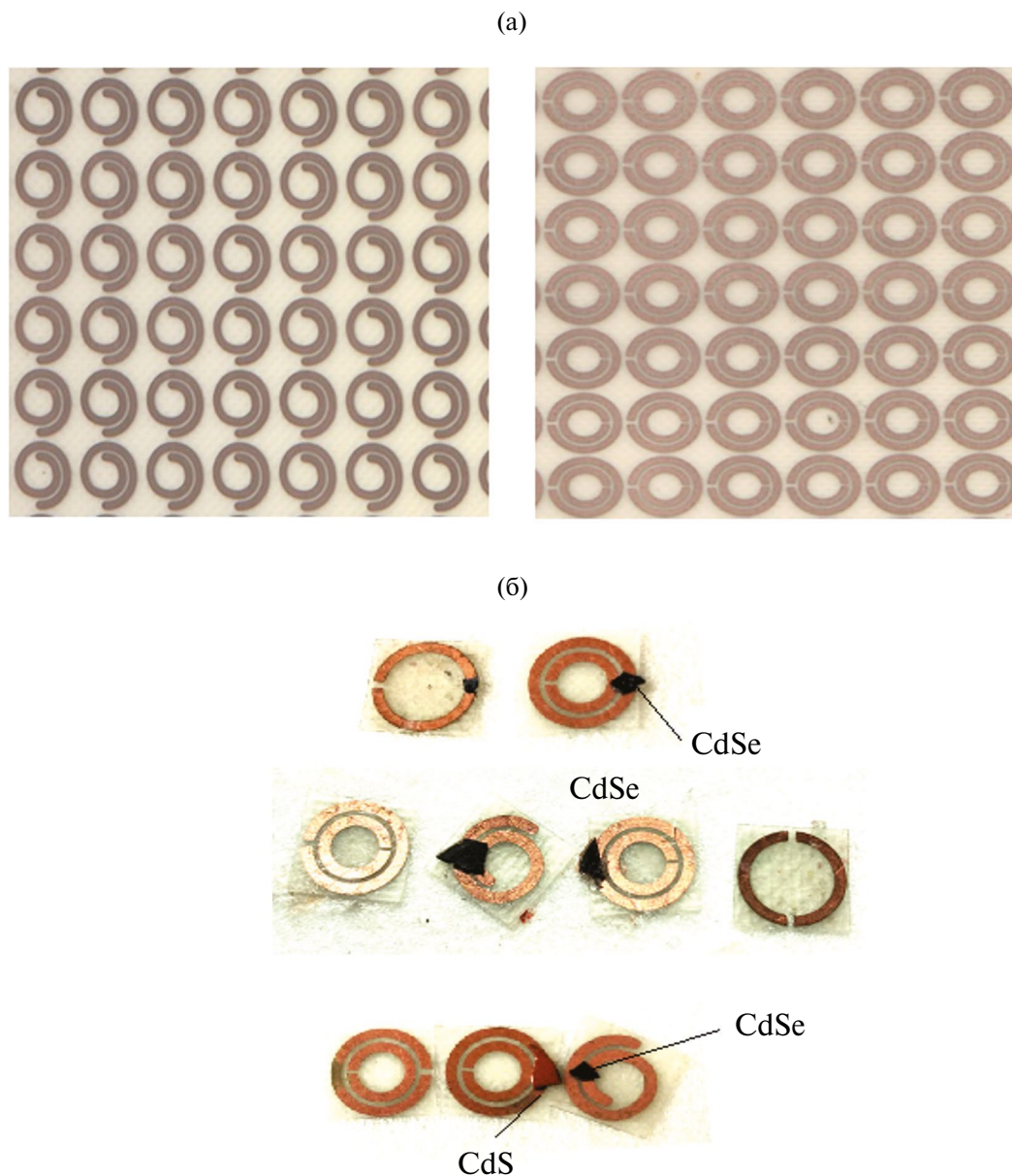
Исследования проводили при комнатной температуре в условиях, необходимых для фотовозбуждения, когда энергия фотона  $h\nu$  выше ширины запрещенной зоны, например, для GaAs  $E_g = 1.42$  эВ [ $h\nu (\lambda = 0.53$  мкм)  $> E_g$ ] или близка к ширине запрещенной зоны при  $\lambda = 0.97$  мкм [20].

## СТРУКТУРЫ МЕТА-АТОМОВ С КИРАЛЬНЫМИ ПЛАНАРНЫМИ МЕДНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, СОВМЕСТИМЫМИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (CdS-, CdSe-ВКЛЮЧЕНИЯМИ)

Изготовлена планарная киральная структура (мета-поверхность), представляющая собой решетку ориентированных планарных медных кольцевых киральных элементов (мета-атомов) с разрывами (диаметр 6.5 мм, толщина проводящего слоя 0.01 мм, ширина 0.1 мм) методами фотолитографии на металлизированных медью полиамидных пленках толщиной 0.13 мм. Фото решеток с двойными разомкнутыми кольцами и спиральями в 1.5 оборота приведены на рис. 1а.

Для выяснения возможности оптического управления резонансным откликом в гигагерцовом диапазоне исследовали структуры в виде цепочек отдельных мета-атомов с полупроводниковыми включениями в разрывах. Кольцевые элементы располагали на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. Образцы CdS и CdSe толщиной 0.35 мм получали шлифовкой заготовок фоторезисторов ФСК-2 и ФСД-1. Фотографии ряда цепочек приведены на рис. 1б.

В измерениях цепочку располагали в свободном пространстве в разрыве прямоугольных волноводов вдоль оси волновода так, чтобы



**Рис. 1.** Фото мета-поверхностей на основе множества планарных кольцевых и спиральных элементов с разрывами (мета-атомов) и структур в виде цепочек отдельных мета-атомов с CdS- или CdSe-включениями в разрывах: (а) — мета-поверхности; (б) — цепочки.

микроволновое поле  $H$  было направлено вдоль оси элементов, возбуждая резонансы магнитного типа.

В качестве элементов (мета-атомов) используются:

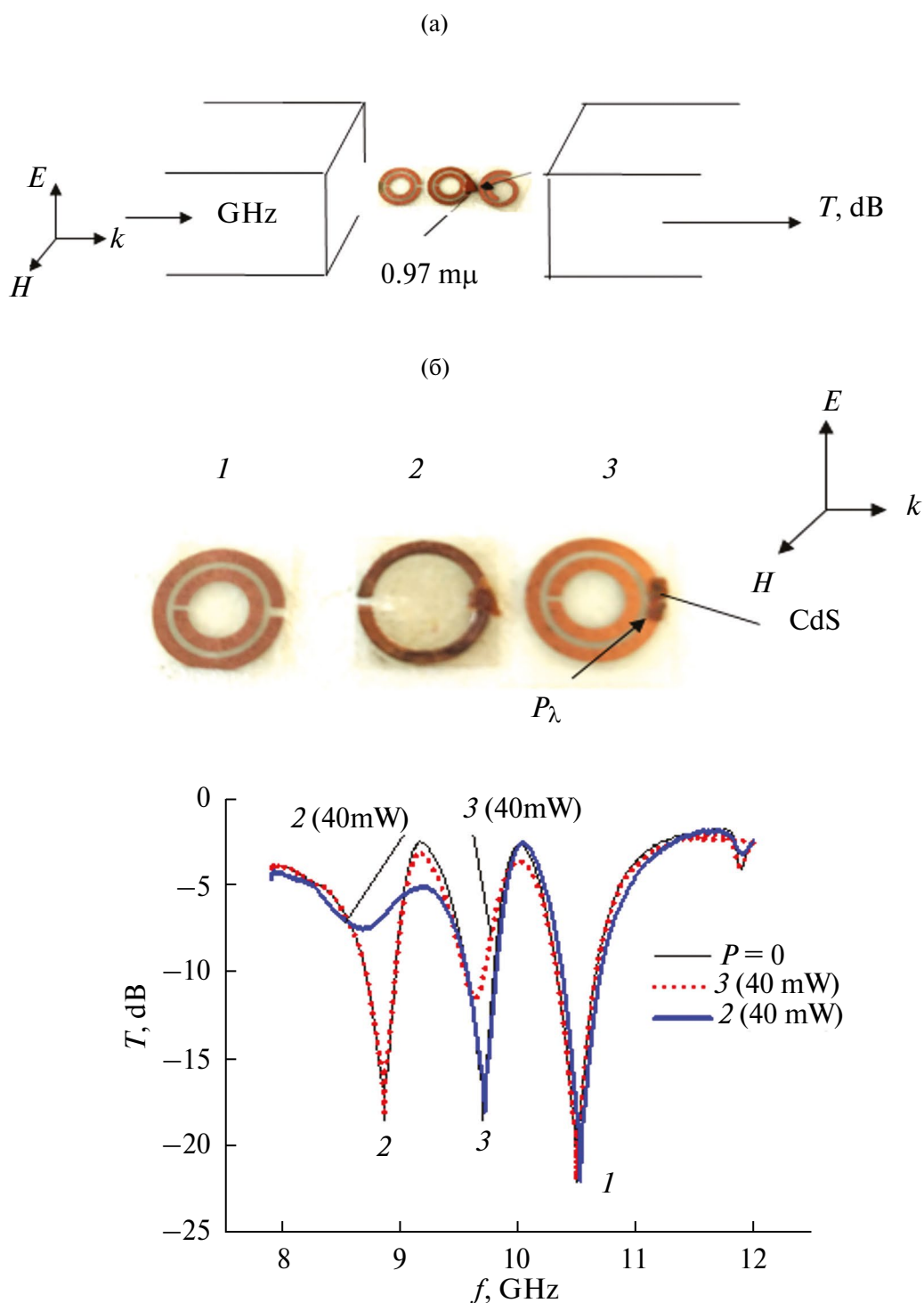
- двойные разомкнутые кольца (double split ring resonators (DSR)) с пластиной CdS или CdSe, перекрывающей внешний разрыв;

- дважды разомкнутые одинарные кольца с двумя разрывами (twice split ring resonators (TSR)), один из которых нагружен пластиной полупроводника;

- спирали в полтора оборота с пластиной полупроводника между внешним и внутренним проводом (Sp).

DSR довольно подробно изучены теоретически и экспериментально авторами работ [21, 22].

Результаты исследований трансформации гигагерцовых резонансных откликов с цепочками планарных кольцевых элементов приведены на рис. 2а–в. Фото метаструктур представлены на соответствующих вставках, каждому элементу соответствует определенный резонансный отклик в спектре  $T$ , который отмечен номером элемента.



**Рис. 2.** Измеренный в свободном пространстве резонансный отклик прохождения  $T$  с цепочками: (а) — схема измерений, (б) — для трех элементов (1 — двойное разомкнутое кольцо DSR; 2 — дважды разомкнутое одинарное кольцо TSR с CdS в разрыве; 3 — DSR с CdS во внешнем разрыве); (в) — для четырех элементов (1 — DSR; 2 — спираль с CdSe между внешним и внутренним проводом; 3 — DSR с CdSe во внешнем разрыве; 4 — TSR). Продолжение см. на с. 58.

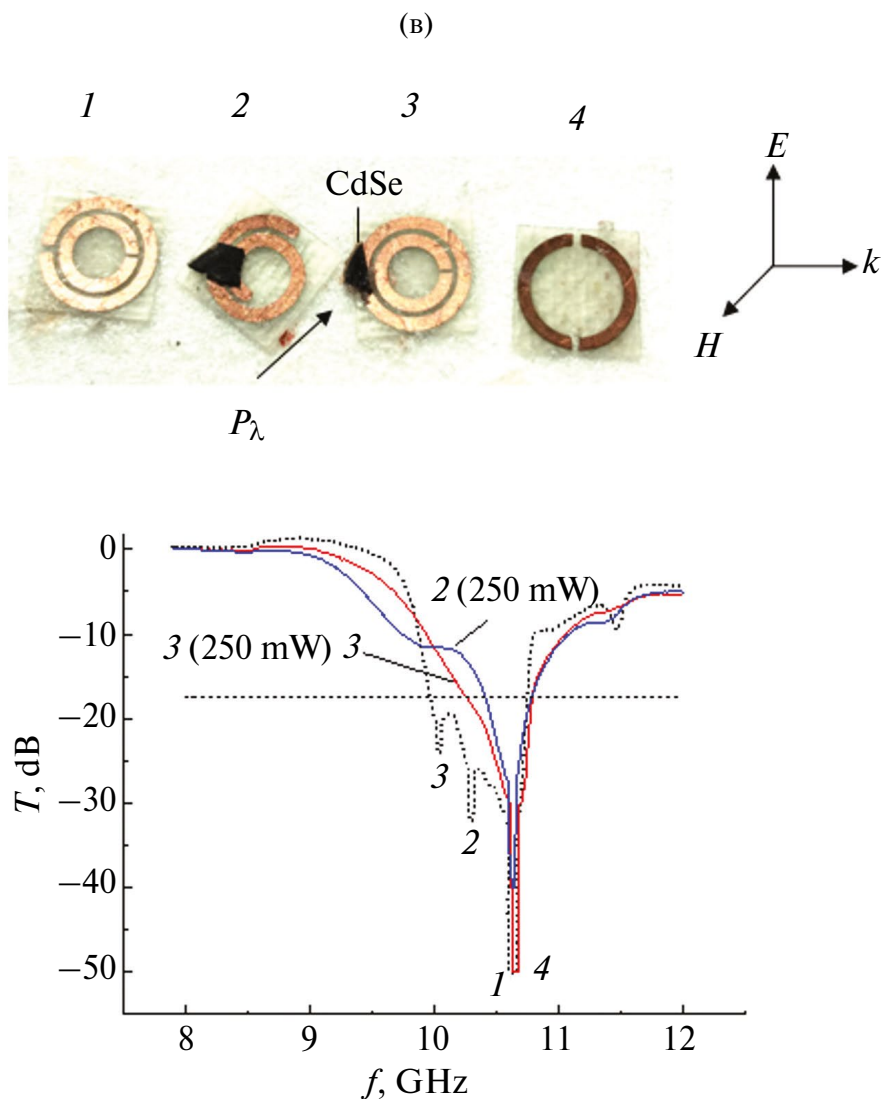


Рис. 2. Окончание.

Информация о мощности оптической накачки содержит номер облучаемого элемента. Обозначение на кривых типа 3 (250 мВт) означает, что облучается элемент 3 при мощности оптической накачки 250 мВт. Обозначение  $T_{\min} 2$  (8.9 ГГц, -18.5 дБ) означает, что речь идет о резонансном минимуме  $T_{\min}$  резонансного отклика элемента 2, частота минимума равна 8.9 ГГц, глубина равна -18.5 дБ.

Схема измерений приведена на рис. 2а.

На рис. 2б приведены данные, которые относятся к цепочке из 3 элементов (DSR, TSR с CdS в одном из разрывов, DSR с CdS во внешнем разрыве (фото на вставке рис. 2б)). Видим, что при отсутствии фотооблучения ( $P_\lambda = 0$  мВт) в спектре  $T$  выделяются три четко разделенных резонансных минимума:  $T_{\min} 2$  (8.9 ГГц, -18.5 дБ),

соответствующий элементу 2 (TSR с CdS);  $T_{\min} 3$  (9.7 ГГц, -18.5 дБ), соответствующий элементу 3 (DSR с CdS);  $T_{\min} 1$  (10.54 ГГц, -22 дБ), соответствующий элементу 1 (DSR). Показана поочередная трансформация резонансов 2 и 3 при поочередном облучении элементов 2 и 3 с поочередным увеличением  $T_{\min}$  в случае  $P_\lambda = 40$  мВт. Отмечен факт, что облучение CdS в элементе 2 приводит к трансформации резонанса 2 почти до уровня прозрачности (резонанс исчезает) и не влияет на резонансы 1 и 3. Облучение CdS в элементе 3 приводит к увеличению  $T_{\min}$  резонанса 3 без изменения резонанса 1 и 2.

Рис. 2в относится к цепочке из 4 элементов: (1) — DSR, (2) — Sp с CdSe между внешним и внутренним проводом, (3) — DSR с CdSe во внешнем разрыве, (4) — TSR; фото на вставке рис. 2в. На рис. 2в можно увидеть, что при отсутствии

фотооблучения ( $P_\lambda = 0$  мВт) в спектре  $T$  проявляется довольно широкая частотная полоса запрета с тремя минимумами (10 ГГц,  $-24$  дБ; 10.3 ГГц,  $-32$  дБ; 10.6 ГГц,  $-50$  дБ), которая на уровне  $-20$  дБ простирается от 9.98 до 10.73 ГГц. При поочередном облучении элементов 2 и 3 ширина фильтрующей полосы запрета сужается от 0.75 ГГц при  $P_\lambda = 0$  мВт до 0.4 ГГц при  $P_\lambda = 2$  (250 мВт) с одним минимумом (10.6 ГГц,  $-40$  дБ).

Таким образом, изменение порядка следования элементов, их количества приводит к разнообразию резонансных откликов в спектре  $T$  и разным функциональным возможностям метаструктур.

Предложенные методы и подходы можно применить к разнообразным структурам с множеством метаатомов (метаповерхностей) при выполнении определенных требований к управляющим оптическим сигналам (например, к синхронизации), обеспечивающим заданные коэффициенты пропускания и отражения в ГГц-диапазоне. Метаповерхности востребованы для управления многорезонансным спектром при распространении широких пучков электромагнитных волн, для разработки управляемых фильтров и антенн в микроэлектронике.

### КИРАЛЬНЫЕ МНОГОЗАХОДНЫЕ МЕДНЫЕ СПИРАЛИ (МЕТАДИПОЛИ)

Метадиполи представляют собой мини-резонаторы на основе киральной многозаходной медной спирали вокруг полупроводникового сердечника (элемента оптического управления), диаметр провода 0.3 мм, шаг спирали равен приблизительно 2 мм. Применены GaAs ( $2 \times 1 \times 20$  мм) — метадиоль I и Si ( $4 \times 0.5 \times 14$  мм) — метадиоль II. Резонансная частота метадиольей зависит от длины спирали, добротность резонанса (глубина резонансного минимума в спектре коэффициента прохождения  $T$ , дБ) зависит от связи метадиольей с питающим волноводом, связь (ниже критической или выше критической) идентифицируется по изменению добротности с изменением поглощения в нагрузке.

Измерения ГГц-отклика проводили в условиях свободного пространства при помещении метадиольей в разрыве прямоугольных волноводов (схема на рис. 3а).

На рис. 3б приведены результаты измерений динамики резонансного отклика метадиольей I в спектре  $T$ , дБ при изменении мощности лазерно-волоконного облучения  $P_\lambda$  ( $\lambda = 0.97$  мкм), фото метадиольей I на вставке к рис. 3б. Видим,

если в отсутствие фотооблучения ( $P_\lambda = 0$  мВт) резонансная частота равна 9.5 ГГц, а глубина равна  $-12$  дБ, то с увеличением  $P_\lambda$  происходит трансформация отклика от увеличения глубины резонанса ( $-35$  дБ) при  $P_\lambda = 60$  мВт (связь метадиольей с питающим волноводом выше критической) до уровня прозрачности вне резонанса при  $P_\lambda = 120$  мВт.

Динамика резонансного отклика с метадиольей II продемонстрирована на рис. 3в. С увеличением мощности  $P_\lambda$  волоконно-оптического облучения происходит уменьшение глубины резонанса (связь метадиольей с питающим волноводом ниже критической), которая приближалась к уровню прозрачности вне резонанса. Это вполне ожидаемо, учитывая увеличение мнимой части диэлектрической проницаемости GaAs и Si на микроволнах при фотовозбуждении [18].

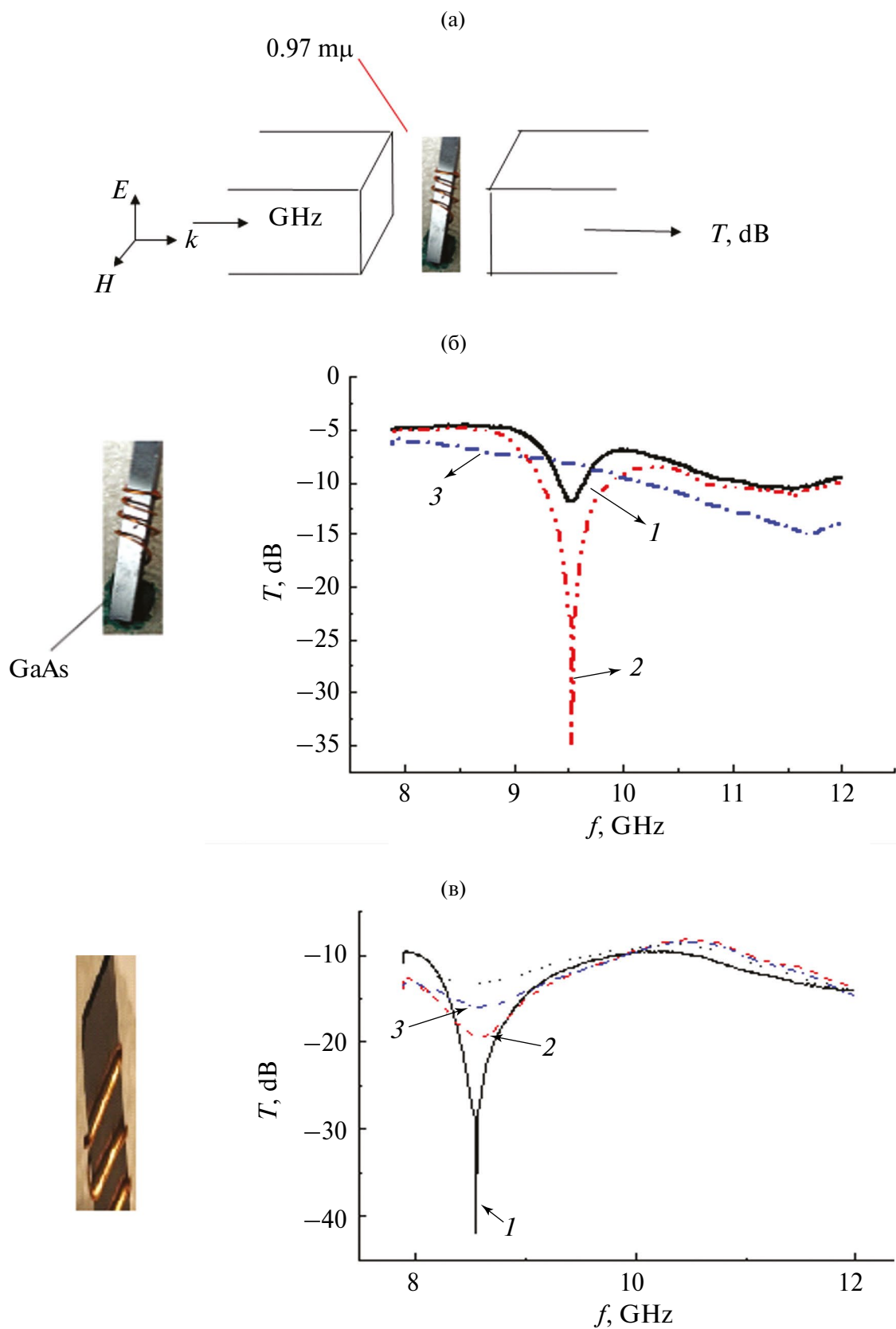
### КИРАЛЬНЫЕ МНОГОЗАХОДНЫЕ МЕДНЫЕ СПИРАЛИ (МИНИРЕЗОНАТОРЫ) ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ТЕСТОВ

Предлагаем применить многозаходные киральные спирали, представляющие собой мини-резонаторы открытого типа для экспресс-тестов качественной оценки функциональных свойств в ГГц-диапазоне полупроводниковых включений (произвольной формы, малых размеров) при оптическом внешнем воздействии, учитывая востребованность в микроэлектронике при зависимости от технологии, разнообразии полупроводников, в условиях развития новых технологий.

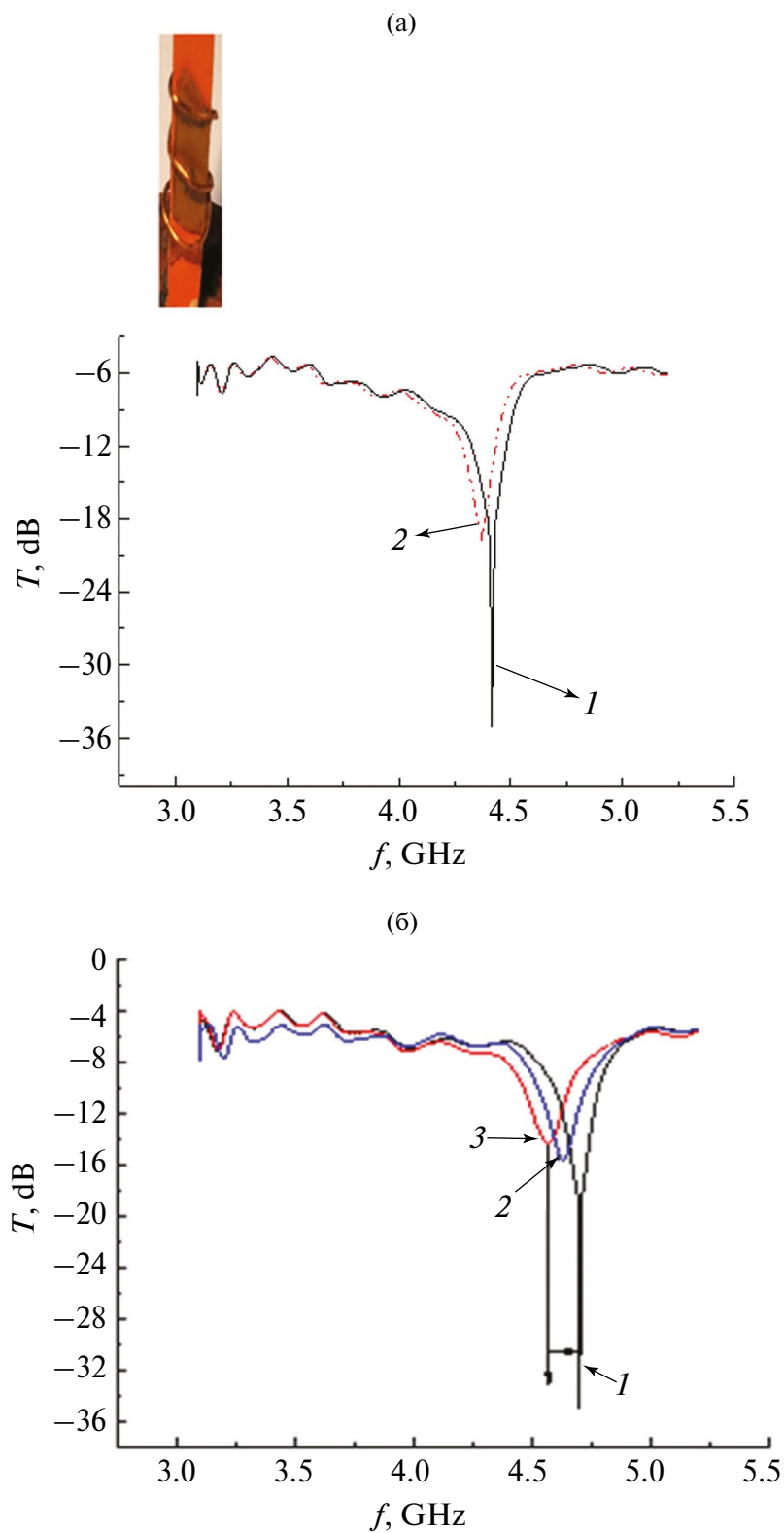
В качестве источника облучения применяли общедоступные, сравнительно дешевые средства, например, лампу галогеновую типа Н1, 12 В, 50 Вт, излучающую белый свет (большой спектр длин волн от видимого до инфракрасного), расположив ее на некотором расстоянии от мини-резонатора с полупроводником. Использовали фокусирующую линзу и набор фильтров, например, ИКС-3, Hg 436. Применение разных фильтров может позволить выделить оптимальные длины волн облучения, что полезно и для оценки запрещенной зоны.

Результаты измерений с CdS ( $2 \times 0.6 \times 16$  мм) и CdSe ( $3 \times 0.1 \times 4$  мм) в мини-резонаторах приведены на рис. 4а, 4б.

На рис. 4а представлена динамика резонансного отклика многозаходной спирали с CdS при фотооблучении галогеновой лампой. При  $P = 0$  мВт, частота резонансного минимума равна



**Рис. 3.** Резонансный отклик прохождения  $T$  с электрическим полуволновым метадиполем, измеренный на гигагерцах в зависимости от мощности волоконно-оптического облучения на длине волны  $0.97 \mu\text{м}$  при  $P = 0$  (1); 60 (2); 120 (3): (а) – схема измерений, (б) – с метадиполем I (GaAs-сердечник), (в) – с метадиполем II (Si-сердечник).



**Рис. 4.** Резонансный отклик мини-резонатора на основе многозаходной киральной спирали с полупроводниковым включением, измеренный на гигагерцах при фотооблучении галогеновой лампой при  $P = 0$  (1); 110 мВт (2), 130 мВт (3): (a) — с CdS; (б) — с CdSe.

4.41 ГГц, глубина равна  $-35$  дБ, а при  $P = 110$  мВт происходит смещение частоты к низким частотам ( $f = 4.37$  ГГц), что свидетельствует об увеличении действительной части фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости CdS, уменьшение глубины до  $-29$  дБ связано с увеличением мнимой части.

Аналогичные зависимости с CdSe приведены на рис. 4б — смещение частоты к низким частотам и уменьшение глубины резонансного минимума при фотооблучении галогеновой лампой.

Наблюдаемые смещение частоты и уменьшение глубины резонанса мини-резонаторов с полупроводниковыми включениями, связываемые с увеличением действительной и мнимой частей фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости CdS и CdSe, согласуются с количественными измерениями прямым резонаторным методом в волноводном резонаторе (4.7 ГГц) при лазерно-волоконном облучении ( $\lambda_1 = 0.97$  мкм и  $\lambda_2 = 0.53$  мкм) [12, 18, 23].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разработки управляемых фильтров и антенн в микроэлектронике, связанной с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью волн микроволнового диапазона, исследованы новые оптически-управляемые структуры в виде цепочек метаатомов (планарных электропроводящих киральных кольцевых элементов с разрывами, нагруженными CdS- и CdSe-включениями). Показано, что при изменении мощности оптического излучения  $P_\lambda = 0-250$  мВт ( $\lambda = 0.97$  мкм), направляемого оптоволоконном в область определенного разрыва, в многорезонансном спектре прохождения  $T$  происходит плавная селективная трансформация соответствующего резонансного отклика без изменения резонансных откликов других метаатомов в зависимости от геометрии и вида метаструктуры.

Предложенные методы и подходы можно применить к разнообразным структурам с множеством метаатомов (метաповерхностям) при выполнении определенных требований к управляющим оптическим сигналам (например, к синхронизации), обеспечивающим заданные коэффициенты пропускания и отражения в ГГц-диапазоне. Метаповерхности востребованы для управления многорезонансным спектром при распространении широких пучков электромагнитных волн.

Исследованы цилиндрические образцы на основе киральных многозаходных медных спиралей с полупроводниковыми сердечниками GaAs, Si и включениями CdS и CdSe: метадиполи (мини-резонаторы), легко реализуемые для измерений на разных частотах, позволяющие фиксировать небольшие изменения нагрузки, применяя включения неопределенной формы и малых размеров.

Предложен экспресс-тест динамики диэлектрических свойств полупроводников в ГГц-диапазоне при фотооблучении, основанный на применении мини-резонаторов и галогеновой лампы, востребованный развитием новых технологий и разнообразием полупроводников.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, № 075-00395-25-00.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lindell V., Vitonen A. J., Tretyakov S. A.* Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. Norwood, MA: Artech House, 1994.
2. *Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шамров А.Д.* // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 11. С. 1201.  
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199711c.1201>
3. *Velez A., Bonache J., Martin F.* // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. V. 18. № 1. P. 28.  
<https://doi.org/10.1109/LMWC.2007.911983>
4. *He Y.X., He P., Yoon S.D., Parimi P.V., Rachford F.J., Harris V.G., Vittoria C.* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. V. 313. № 1. P. 187.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.12.031>
5. *Zhao H.J., Zhou J., Zhao Q., Li B., Kang L., Bai Y.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. № 13. P. 131107.  
<https://doi.org/10.1063/1.2790500>
6. *Srinivasan G., Tatarenko A.S., Bichurin M.I.* // Electron. Lett. 2005. V. 41. № 10. P. 596.  
<https://doi.org/10.1049/el:20050925>
7. *Chen H.T., O'Hara J.F., Azad A.K., Taylor A.J.* // Laser Photonics Rev. 2011. V. 4, P. 513.  
<https://doi.org/10.1002/lpor.201000043>

8. *Padilla W.J., Taylor A.J., Highstrete C., Lee M., Averitt R.D.* // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 107401. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.107401>
9. *Chen H.T., Padilla W.J., Zide J., Gossard A.C., Taylor A.J., Averitt R.D.* // *Nature.* 2006. V. 444. P. 597. <https://doi.org/10.1038/nature05343>
10. *Xiao S., Wang T., Jiang X., Liu T., Zhou C., Zhang J.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53. P. 503002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abaced>
11. *Manceau J.M., Shen N.-H., Kafesaki M., Soukoulis C.M., Tzortzakis S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 02111. <https://doi.org/10.1063/1.3292208>
12. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П., Фишер П.С.* // *Письма в ЖЭТФ* 2021. Т. 114. № 9. С. 586. <https://doi.org/10.31857/S1234567821210023>
13. *Tawk Y., Costantine J., Christodoulou C.G.* // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* 2012. V. 11. P. 716. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2204850>
14. *Cameron R., Kudsia C., Mansour R.* *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications.* John Wiley & Sons 2018.
15. *Turpin Jeremiah P., Bossard Jeremy A., Morgan Kenneth L., Werner Douglas H., Werner Pingjuan L.* // *Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Antennas and Propagation. Review Article Reconfigurable and Tunable Metamaterials: A Review of the Theory and Applications.* Volume. 2014. P. 429837. <https://doi.org/10.1155/2014/429837>
16. *Zheludev N.I., Kivshar Y.S.* // *Nature Materials.* 2012. V. 11. № 11. P. 917. <https://doi.org/10.1038/nmat3431>
17. *Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А.* // *Журнал радиоэлектроники.* 2010. № 4.
18. *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Фишер П.С.* // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2024. № 1. С. 41. <https://doi.org/10.31857/S1028096024010062>
19. *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Фишер П.С.* // *Физика твердого тела.* 2025. Т. 67. № 1. С. 31. <https://doi.org/10.61011/FTT.2025.01.59765.6-25>
20. *Куммель Ч.* // *Введение в физику твердого тела.* 8-е издание. Нью-Джерси: Wiley, 2013. С. 379.
21. *Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J.* // *IEEE Trans. MTT-47.* 1999. № 11. P. 2075. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
22. *Kostin M.V., Shevchenko V.V.* *Adv. in Complex Electromagnetic Mater.* / Eds A. Priou et al. NATO ASI Series. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ, 1997. P. 261.
23. *Бутылкин В.С., Фишер П.С., Крафтмахер Г.А., Казанцев Ю.Н., Каленов Д.С., Мальцев В.П., Пархоменко М.П.* // *Радиотехника и Электроника.* 2023. Т. 68. № 2. С. 152. <https://doi.org/10.31857/S003384942302002X>

## Gigahertz Resonance Response and Functional Features during Photoexcitation of Chiral Metasurfaces and Metastructures with CdS, CdSe, GaAs, Si

G. A. Kraftmakher<sup>1,\*</sup>, V. S. Butylkin<sup>1,\*\*</sup>, P. S. Fisher<sup>1,\*\*\*</sup>

*<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,  
Fryazino, 141190 Russia*

*\*e-mail: gaarkr139@mail.ru*

*\*\*e-mail: vasebut@yandex.ru*

*\*\*\*e-mail: fisherps@mail.ru*

Under conditions of free space in the range of 3–12 GHz, a transformation of the resonant responses of chiral metastructures and metasurfaces with semiconductor inclusions during photoexcitation was detected. Chains of planar electrically conductive chiral ring elements with gaps (metaatoms) loaded with CdS and CdSe inclusions are used. It is shown that when the power of optical radiation  $P_\lambda = 0\text{--}250$  milliwatt ( $\lambda = 0.97$  microns), directed by optical fiber into the region of a certain gap, changes, a smooth selective transformation of the corresponding resonant response occurs in the spectrum of the gigahertz transmission coefficient without changing the resonant responses of other elements depending on the geometry and type of metastructure. Cylindrical samples based on chiral multipass copper spirals with GaAs, Si semiconductor cores: metadipoles (mini-resonators) are studied. The structures under study can be useful for applications in controlled filters and antennas; for rapid tests required by the development of new technologies and a variety of semiconductors.

**Keywords:** gigahertz range, metastructure, ring elements with gaps, multi-turn copper spirals, CdS, CdSe, Si, GaAs inclusions, photoexcitation, fiber laser irradiation, and gigahertz wave filtering.