

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.6>

УДК: 535-14;537.67

**ОПТИЧЕСКИ-УПРАВЛЯЕМЫЕ МЕТА-ДИПОЛИ  
(МИНИ-РЕЗОНАТОРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ)  
ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ТЕСТОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Г.А. Крафтмахер, В.С. Бутылкин, П.С. Фишер

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
141120, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2026 г.

**Аннотация.** Предложен и экспериментально исследован в ГГц-диапазоне экспресс-метод идентификации динамических характеристик фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводников в зависимости от мощности оптического внешнего воздействия, востребованный в управляемой микроэлектронике в связи с разнообразием полупроводников и источников фотооблучения в условиях развития новых технологий. Метод основан на применении мета-диполей (мини-резонаторов), представляющих собой киральную многозаходную медную спираль, которые позволяют фиксировать небольшие изменения фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводникового включения (произвольной формы и размеров) измерениями в ГГц-диапазоне изменений глубины и частоты резонанса при фотооблучении в зависимости от мощности облучения на фоне частотной зависимости прохождения микроволн вне резонанса. В качестве источника облучения используется галогеновая лампа и набор светофильтров для выявления оптимальной длины волны фотооблучения. Метод апробирован с базовыми высокоомными полупроводниками GaAs, Si, CdS, CdSe.

**Ключевые слова:** микроволны, полуволновые мета-диполи (мини-резонаторы), полупроводник, фотоиндуцированная диэлектрическая проницаемость, галогеновая лампа, светофильтры, фотооблучение.

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

**Автор для переписки:** Крафтмахер Галина Ароновна, [gaarkr139@mail.ru](mailto:gaarkr139@mail.ru)

## Введение

В настоящее время представляет интерес реализация и экспериментальные исследования новых функциональных метаструктур и новых методов управления для развития элементной базы в микроэлектронике, связанной с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью волн микроволнового диапазона. Особое внимание уделяется применению полупроводников и изучению фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости для оптического управления распространением микроволн при взаимодействии с разными мета-структурами и их элементами, содержащими полупроводниковые включения [1,2]. В этом случае наблюдается низкая чувствительность к электромагнитным помехам, хорошая развязка между каналами сигнала и управления в отличие от методов электрического управления. Наиболее привлекательным является быстрое действие и возможность волоконно-оптического адресного воздействия на интенсивность резонансов отдельных элементов в широком диапазоне частот.

В [1] были предложены и продемонстрированы прямые методы измерений в ГГц-диапазоне фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводников, основанные на применении волноводных резонаторов и волоконно-лазерного облучения ( $\lambda = 0,97$  мкм и  $0,53$  мкм).

В [2] впервые предложены, выполнены и экспериментально исследованы в диапазоне 3-12 ГГц в условиях прямоугольных волноводов и свободного пространства магнито-оптически- управляемые полуволновые мета-диполи, представляющие собой мини-резонаторы на основе медной многозаходной

киральной спирали, содержащей спаренные сердечники: полупроводник *GaAs* как элемент оптического управления и железиттриевый феррит в качестве элемента магнитного управления.

В связи с разнообразием полупроводников и источников оптического облучения в условиях развития новых технологий появляется необходимость разработки экспресс-методов оценки (идентификации) динамики фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости как для проверки и отбора известных полупроводников, реализованных по разным технологиям или из разных партий, так и новых сложных полупроводниковых соединений. Важно также выяснить оптимальную длину волны фотооблучения, когда неизвестна величина запрещенной зоны, учитывая, что исследуемые образцы могут быть малых размеров и неопределенной формы.

В настоящей работе впервые предлагаем экспресс-метод, основанный на применении мини-резонаторов открытого типа (мета-диполей) на основе киральной многозаходной медной спирали, содержащей исследуемый полупроводник, и измерении их ГГц-резонансного отклика с использованием в качестве источника облучения галогеновой лампы с набором фильтров для выяснения оптимальной длины волны фотооблучения. Теоретически киральные объекты в виде длинных спиралей малого по сравнению с длиной волны радиуса рассмотрены в обзоре [3]. Учитываем, что для выполнения условий фотовозбуждения полупроводников энергия фотона должна быть выше ширины запрещенной зоны  $E_g$  или близка к ней. Метод апробируем с базовыми высокоомными полупроводниками Si, GaAs, CdS, CdSe.

### **1. Мета-диполи. Методика эксперимента динамики ГГц-резонансного отклика при внешнем оптическом воздействии**

Полуволновой мета-диполь (мини-резонатор цилиндрической формы открытого типа) выполнен на основе киральной многозаходной медной спирали (диаметр провода 0.3 мм, шаг спирали равен приблизительно 2 мм), которая содержит исследуемое полупроводниковое включение (Рис. 1).

Для апробации применены полупроводниковые стержни высокоомных  $Si$  (поперечное сечение  $4 \times 0.5$  мм, длина 14 мм) и  $GaAs$  (поперечное сечение  $2 \times 1$  мм, длина 20 мм), а также пластинки  $CdS$  и  $CdSe$  ( $2 \times 0.6 \times 16$  мм). Диаметр и длина цилиндров, нагруженных  $CdS$  или  $CdSe$  равны приблизительно 2 мм и 20 мм. Предлагаемые мета-диполи обладают высокой чувствительностью, даже небольшие изменения нагрузки, связанные с фотооблучением небольшой мощности  $P_\lambda$ , отражаются на резонансном ГГц-отклике.

Идентификацию динамических характеристик фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводников можно исследовать в разных частотных диапазонах, так как резонансная частота мета-диполей (мини-резонатор открытого типа) зависит от длины спирали. Изменение добротности резонатора при фотооблучении мощностью  $P_\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны облучения) относительно  $P_\lambda = 0$  зависит от изменения мнимой части фотоиндуцированной микроволновой диэлектрической проницаемости полупроводника. Сдвиг частоты резонатора – от действительной части.

Изменение добротности традиционно можно было бы оценивать по изменению ширины резонансной кривой, однако при малых изменениях ширины чувствительность такого способа мала. Мы используем более чувствительный способ по изменению глубины резонансной кривой, который был предложен в [7] применительно к волноводному резонатору.

Продемонстрируем метод измерений для диапазона 3-6 ГГц с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-58. Измеряем динамику частотных зависимостей коэффициента прохождения  $T$  при фотовозбуждении полупроводниковых включений, расположив мета-диполь в свободном пространстве в разрыве прямоугольных волноводов (сечение  $48 \times 24$  мм), наблюдая резонансные минимумы  $T$  – дипольные резонансы ДР, возбуждаемые микроволновым электрическим полем  $E \parallel$  направлению спирали как в отсутствии полупроводниковых включений, так и с ними в условиях оптического воздействия. При изменении ориентации мета-диполя интенсивность (глубина) резонанса уменьшается, и резонанс исчезает при  $E \perp$  (микроволновое поле  $H \parallel$ ) направлению спирали.

Измеряем изменение глубины резонанса в зависимости от  $P_\lambda$  при разных  $\lambda$ . При увеличении мощности облучения (при любой ориентации) глубина резонанса уменьшается и происходит его исчезновение на фоне частотной зависимости прохождения микроволн вне резонанса, что ожидаемо, учитывая увеличение мнимой части микроволновой фотоиндуцированной, диэлектрической проницаемости полупроводника [1,5,6].

Схема измерений приведена на Рис. 2.

В качестве источника облучения предлагаем лампу галогеновую (Г.Л.) типа Н1, 12 В, 50 Вт, излучающую белый свет (большой спектр длин волн от видимых – до инфракрасных), расположив ее на некотором расстоянии от мини-резонатора с полупроводником, используя фокусирующую линзу. Это общедоступное, сравнительно дешевое средство. Мощность  $P_\lambda$  излучения, падающего на образец, измеряемую Laser Power Meter (марка Field Max, фирма COHERENT), можно было менять, регулируя напряжение питания с помощью ЛАТРА. Чтобы выявить оптимальные длины волн облучения ( $\lambda$ ), что полезно и для оценки запрещенной зоны, используем разные свето-фильтры: инфракрасный стеклянный ИКС-3 (толщина 1 мм) пропускает спектр  $\lambda = 0,8 \rightarrow 1$  мкм; видимый синий фильтр Hg 436 (набор из двух стекол, толщина 5 мм) пропускает  $\lambda = 0,436$  мкм. Применяем также отражающий фильтр (зеркало интерференционное диэлектрическое) в измерительной схеме на отражение. В этом случае от зеркала полностью отражается  $\lambda = 1,08$  мкм (100 %) и немного отражаются другие  $\lambda$  белого света (около 4 %).

Схемы измерений  $T$  с Г.Л., фокусирующими линзами и набором фильтров приведены Рис. 3а,б: а – схема на пропускание  $P_\lambda$ , б – схема на отражение  $P_\lambda$ .

Продемонстрируем результаты измерений динамики ГГц-резонансного отклика мета-диполя с GaAs в схеме на пропускание  $P_\lambda$  в зависимости от величины  $P_\lambda$  в условиях разных  $\lambda$ , используя соответствующие фильтры (Рис. 4). На Рис 4 видим, что в отсутствие фотооблучения ( $P_\lambda = 0$  мВт, кривая 1) резонансная частота равна 3,59 ГГц, а глубина равна –24 дБ. С увеличением

$P_\lambda = 10$  мВт (кривая 2) для  $\lambda = 0,43$  мкм (при применении фильтра Hg 436) происходит уменьшение глубины резонанса до  $-12$  дБ. При дальнейшем увеличении  $P_\lambda = 30$  мВт (кривая 3) для  $\lambda = 0,8 \rightarrow 1$  мкм (с фильтром ИКС-3) наблюдаем уменьшение глубины резонанса до  $-7,5$  дБ. Облучение в условиях белого света мощностью  $P_\lambda = 46$  мВт приводит к уменьшению глубины резонанса до  $-5,42$  дБ (кривая 4).

На Рис. 5 приведены результаты измерений с мета-диполем, нагруженным Si при использовании схемы на отражение  $P_\lambda$ , когда на образец 2 падает отраженное от интерференционного зеркала 7 сфокусированное линзой 6 и отфильтрованное фильтром 3 (ИКС-3) излучение ( $\lambda = 1,08$  мкм).

Из Рис. 5 видно, что при  $P_\lambda = 0$  (кривая 1) резонансная частота равна 3.66 ГГц, а глубина равна  $-28$  дБ. Небольшое изменение  $P_\lambda = 1.5$  мВт приводит к уменьшению глубины резонанса до  $-16$  дБ (кривая 2), при дальнейшем увеличении  $P_\lambda = 12$  мВт (кривая 3) и затем при  $P_\lambda = 22$  мВт в отсутствие фильтра (кривая 4) происходит плавное уменьшение глубины резонанса, приближаясь к уровню прозрачности вне резонанса.

Таким образом, наблюдаем уменьшение глубины резонансов с повышением  $P_\lambda$  в случае разных  $\lambda$  (от видимых до инфракрасных) в условиях, необходимых для фотовозбуждения. Так, для GaAs ширина запрещенной зоны  $E_g = 1,42$  эВ [4], что соответствует, как легко показать,  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм; для Si –  $E_g = 1,12$  эВ [4], ( $\lambda_{\max} = 1,1$  мкм).

На Рис. 6 приведены результаты измерений динамики ГГц-резонансного отклика мета-диполя с CdS ( $E_g = 2,42$  эВ,  $\lambda_{\max} = 0.5$  мкм) в схеме на пропускание  $P_\lambda$  в зависимости от величины  $P_\lambda$  в условиях разных  $\lambda$ , используя соответствующие фильтры.

На Рис 6 видим, что в отсутствие фотооблучения ( $P_\lambda = 0$  мВт, кривая 1) резонансная частота равна 4,69 ГГц, а глубина равна  $-35$  дБ. При увеличении  $P_\lambda = 30$  мВт (кривая 2) для  $\lambda = 0,8 \rightarrow 1$  мкм (с фильтром ИКС-3) наблюдаем небольшой сдвиг частоты  $f = 4,66$  ГГц с уменьшением глубины резонанса

до  $-15,36$  дБ. Кривая 3 демонстрирует результат облучения в случае  $\lambda = 0,43$  мкм (с фильтром Hg 436): частота резонанса  $f = 4,63$  ГГц, глубина резонанса  $-15,68$  дБ. Облучение в условиях белого света мощностью  $P_\lambda = 46$  мВт приводит к уменьшению глубины резонанса до  $-14,4$  дБ на частоте  $4,57$  ГГц (кривая 4). Аналогичные результаты получены с CdSe ( $E_g = 1.74$  эВ,  $\lambda_{\max} = 0.7$  мкм).

Как видим, с CdS или CdSe трансформация ГГц-резонансного отклика наблюдается, когда энергия  $h\nu$  фотона ниже ширины запрещенной зоны. Впервые этот эффект был обнаружен и интерпретирован в [1] в условиях волоконно-лазерного облучения, когда энергия  $h\nu$  фотона не только выше ширины запрещенной зоны  $E_g$  [ $h\nu(\lambda_1 = 0,53$  мкм)  $> E_g$ ] при однофотонном возбуждении, но и ниже ее [ $h\nu(\lambda_2 = 0,97$  мкм)  $< E_g$ ] при двухфотонном.

Наблюдаемое смещение частоты резонансных откликов мета-диполей с CdS или CdSe связано с увеличением действительной части фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводниковых включений ( $\text{Re}\varepsilon$ ) в ГГц-диапазоне при оптическом воздействии, уменьшение глубины резонанса мета-диполей обусловлено увеличением мнимой части включений ( $\text{Im}\varepsilon$ ).

Полученные результаты согласуются с количественными измерениями  $\text{Re}\varepsilon$  и  $\text{Im}\varepsilon$  прямым резонаторным методом в волноводном резонаторе отражательного типа на частоте  $4.7$  ГГц при лазерно-волоконном облучении ( $\lambda_1 = 0,97$  мкм и  $\lambda_2 = 0,53$  мкм) [1,5,6].

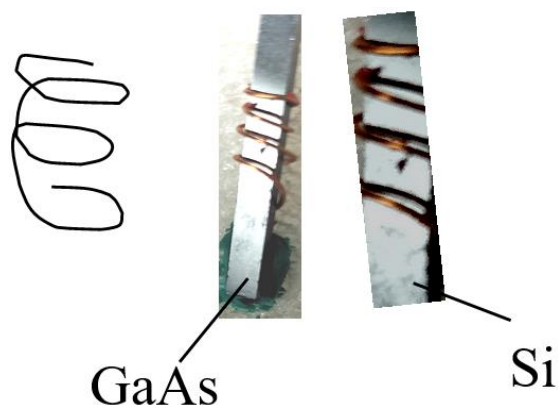


Рис. 1. Фото мета-диполей: свободная спираль, с полупроводниковым сердечником GaAs, с полупроводниковым сердечником Si.

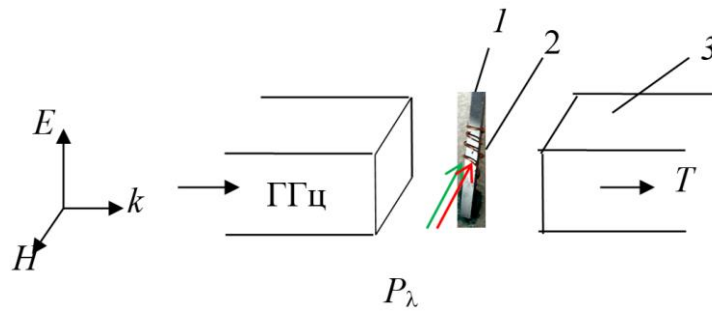


Рис. 2. Схема измерений динамики частотных зависимостей коэффициентов прохождения  $T$  микроволн с мета-диполями. (1 – сердечник GaAs, 2 – киральная медная спираль, 3 – волноводы) в условиях свободного пространства при оптическом облучении полупроводниковых включений мощностью  $P_\lambda$ , ( $\lambda$  – длина волны облучения).

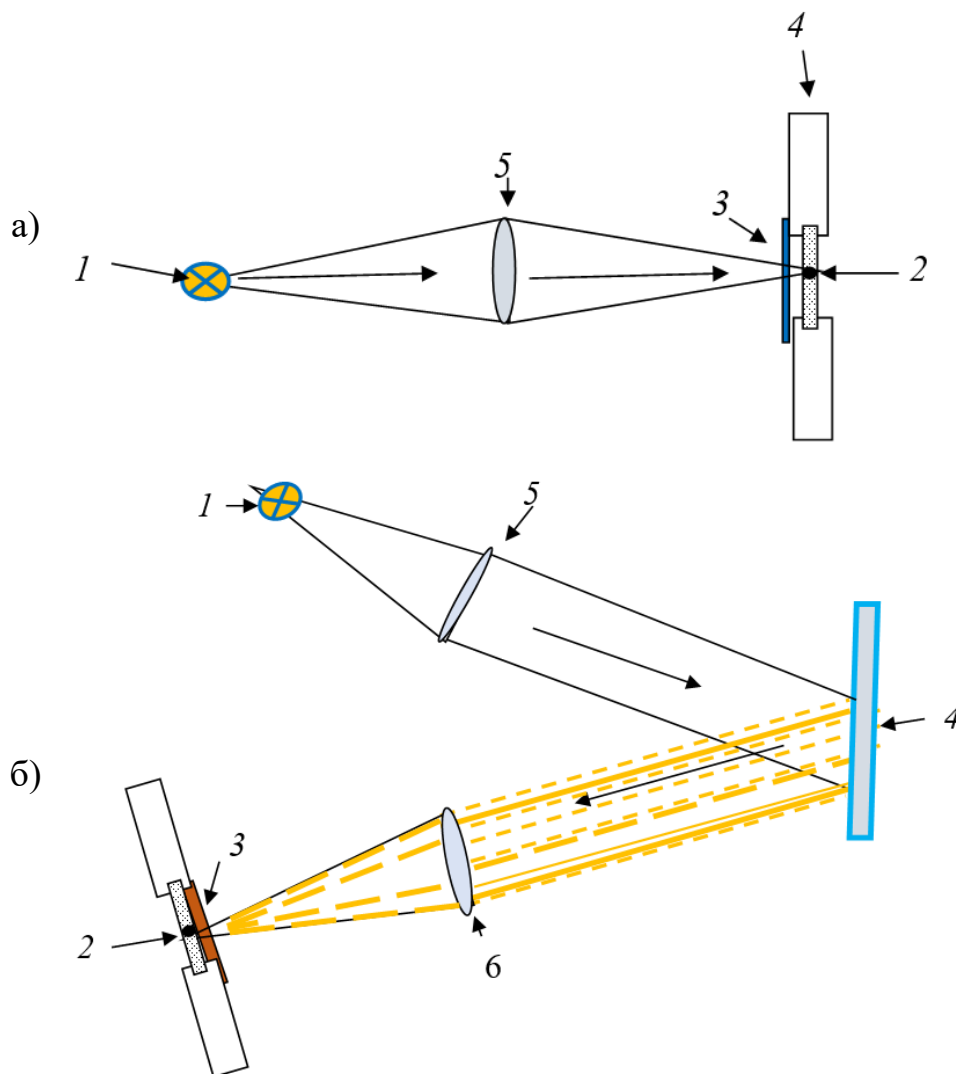


Рис. 3. Схемы измерений ГГЦ-откликов мета-диполей с галогеновой лампой Г.Л. мощностью  $P_\lambda$  (в качестве источника оптического облучения), фокусирующими линзами и набором фильтров: а) схема на пропускание  $P_\lambda$ , б) схема на отражение  $P_\lambda$  (1 – Г.Л., 2 – образец (полупроводниковое включение в мини резонаторе), 3 – фильтр, 4, 5, 6 – фокусирующие линзы, 7 – отражающее зеркало).

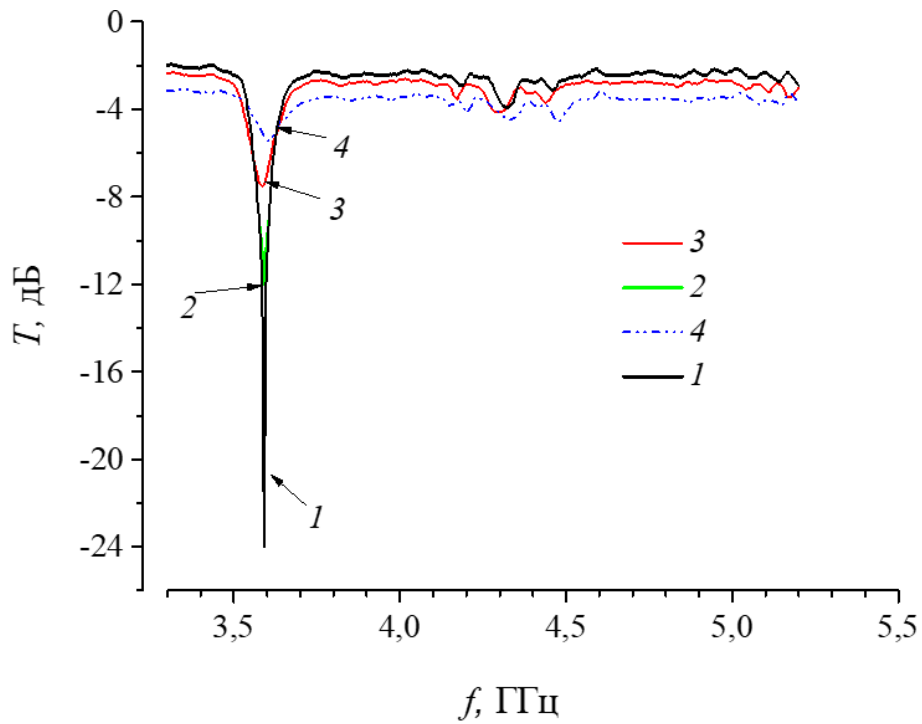


Рис. 4. Динамика ГГц-резонансного отклика мета-диполя с GaAs в схеме на пропускание  $P_\lambda$  в зависимости от величины  $P_\lambda$ :  $P = 0$  (1); 10 мВт –  $\lambda = 0,43$  мкм, Нg 436 (2); 30 мВт –  $\lambda = 0,8 \rightarrow 1$  мкм, ИКС-3 (3); 46 мВт – белый свет (4).

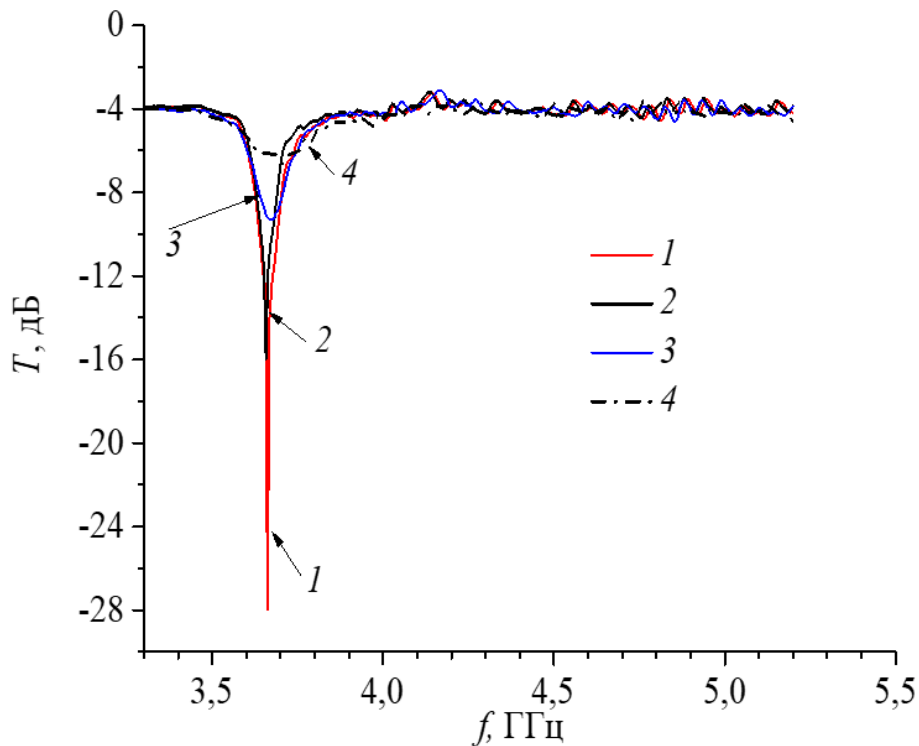


Рис. 5. Динамика ГГц-резонансного отклика мета-диполя с Si в схеме на отражение  $P_\lambda$  в зависимости от величины  $P_\lambda$ :  $P = 0$  (1); 1,5 мВт, ИКС-3 (2); 12 мВт, ИКС-3,  $\lambda = 1,08$  мкм (3); 22 мВт – белый свет (4).

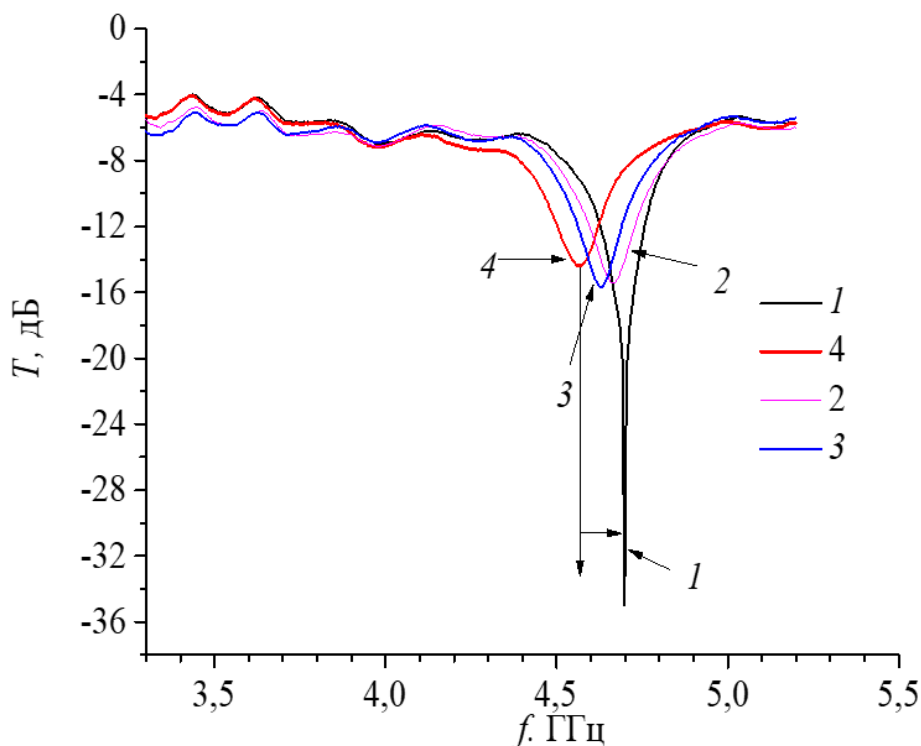


Рис. 6. Динамика ГГц-резонансного отклика мета-диполя с CdS в схеме на пропускание  $P_\lambda$  в зависимости от величины  $P_\lambda$ ;  $P = 0$  (1); 30 мВт –  $\lambda = 0,8 \rightarrow 1$  мкм, ИКС-3 (2); 30 мВт –  $\lambda = 0,43$  мкм, Hg 436 (3); 46 мВт – белый свет (4).

## Заключение

Впервые предложены и реализованы мета-диполи на основе киральной многозаходной медной спирали (мини-резонаторы) для экспресс-тестов в управляемой микроэлектронике, позволяющие измерениями изменений глубины и частоты резонанса качественно оценить динамику фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводникового включения в ГГц-диапазоне при фотооблучении галогеновой лампой в схемах с набором светофильтров для выявления оптимальной длины волны облучения.

Предлагаемый экспресс-метод востребован в фотонной микроэлектронике как для проверки и отбора известных полупроводников, реализованных по разным технологиям или из разных партий, так и новых сложных полупроводниковых соединений в связи с развитием новых технологий и разнообразием полупроводников. Метод позволяет также выяснить оптимальную длину волны фотооблучения, когда неизвестна величина

запрещенной зоны, учитывая, что исследуемые образцы могут быть малых размеров и неопределенной формы. Метод апробирован с базовыми высокоомными полупроводниками GaAs, Si, CdS, CdSe.

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

### Литература

1. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н., Мальцев В.П., Фишер П.С. Трансформация микроволновых резонансных свойств метаструктур с CdS и CdSe при одно- и двухфотонном возбуждении // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т.114. – №9. – С.586. <https://doi.org/10.31857/S1234567821210023>
2. Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Фишер П.С. Оптически- и магнитоуправляемые метадиполи на СВЧ// Физика твердого тела. – 2025. – Т.67. – Вып.1. – С.31. <https://doi.org/10.61011/FTT.2025.01.59765.6-25>
3. Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шатров А.Д. Киральные электродинамические объекты. // Успехи физических наук. – 1997. – Т.167. – №.11. – С.1201. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199711c.1201>
4. Kittel Charles. Theory of Solids, 1963. Willey. P. 435.
5. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Фишер П.С. Не-друдеподобное поведение фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости GaAs и Si в гигагерцовом диапазоне частот. // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2024 – Т. – №1 – С.41-47. <https://doi.org/10.31857/S1028096024010062> . EDN: DPGUGQ
6. Бутылкин В.С., Фишер П.С., Крафтмахер Г.А., Казанцев Ю.Н., Каленов Д.С., Мальцев В.П., Пархоменко М.П. Фотоиндуцированная микроволновая диэлектрическая проницаемость полупроводников: экситонный механизм // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т.68. – №.2. – С. 152-156. <https://doi.org/10.31857/S003384942302002X>

7. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А. Прозрачные металлические пленки в СВЧ. Отклонение от двумерной модели. // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 67, вып. 5. С. 902.

**Для цитирования:**

Крафтмахер Г.А, Бутылкин В.С., Фишер П.С. Оптически-управляемые мета-диполи (мини-резонаторы с полупроводниковыми включениями) для экспресс-тестов в микроэлектронике. // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.6>