

УДК 535-14:537.67

НЕ-ДРУДЕПОДОБНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ GaAs и Si В ГИГАЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

© 2024 г. В. С. Бутылкин^{а,*}, Г. А. Крафтмахер^{а,**}, П. С. Фишер^{а,***}

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, 141190 Россия

*e-mail: vasebut@yandex.ru,

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

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

Поступила в редакцию 23.04.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Обнаружено не-друдеподобное поведение действительной части фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_p$ образцов GaAs и Si в гигагерцовом диапазоне. Измерения проведены прямым резонаторным методом в условиях волоконно-оптического облучения при различной мощности облучения P . Показано, что в согласии с гипотезой об экситонном механизме фотоиндуцированной микроволновой диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_p$ увеличивается с ростом P (с приближением к насыщению выше $P = 200$ мВт) вместо уменьшения в рамках свободных носителей заряда по Друде. Продемонстрирована свидетельствующая в пользу универсальности экситонного механизма общность поведения действительных частей $\text{Re}\epsilon_p$ фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости, наблюдаемой у полупроводников разных типов (прямозонного GaAs и непрямозонного Si) в разных электродинамических системах (волноводы, резонаторы, метаструктуры). Впервые предложены оптически управляемые в гигагерцовом диапазоне структурные элементы метаматериалов (метаструктуры), содержащие резонансные электропроводящие элементы, нагруженные образцами GaAs и Si: метаструктура на основе линейных диполей и полуволновой электрический диполь на основе многозаходной спирали. Впервые измерены гигагерцовые отклики метаструктур и трансформация откликов, связанная с изменением диэлектрической проницаемости Si и GaAs при фотовозбуждении. На основе выдвинутой гипотезы о влиянии экситонов на фотовозбуждение обсужден наблюдаемый эффект насыщения гигагерцовой фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: полупроводник, фотоиндуцированная диэлектрическая проницаемость, гигагерцовый диапазон, не-друдеподобное поведение, экситоны, волноводы, резонаторы, метаструктуры.

DOI: 10.31857/S1028096024010062, EDN: DPGUGQ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием микроволновой фотоники, связанной с передачей, приемом и преобразованием информации с помощью волн микроволнового диапазона и фотонных систем, востребованы оптически управляемые мета(нано)структуры [1–8] и полупроводники как элементы управления в них.

Поскольку функциональные свойства метаматериала во многом определяет динамика комплексной диэлектрической проницаемости ϵ

полупроводника, актуальны исследования фотоиндуцированной ϵ в микроволновом диапазоне, учитывая, к тому же, наблюдаемые существенные различия в терагерцовом диапазоне (друдеподобное поведение в рамках механизма свободных носителей заряда, проявляющееся убыванием $\text{Re}\epsilon_p$ с ростом мощности облучения P) и в гигагерцовом диапазоне (не-друдеподобное, впервые обнаруженное экспериментально в CdS, CdSe [8] и в Si [9] в виде увеличения действительной части диэлектрической проницаемости $\text{Re}\epsilon_p$ с ростом P).

Модель Друде [10], разработанная в свое время для металлов, оказалась приемлемой для полупроводников в терагерцовом диапазоне при исследовании метаматериалов, содержащих Si и GaAs [1–4]. Эта модель была также использована для численных расчетов действительной $\text{Re}\epsilon_p$ и мнимой $\text{Im}\epsilon_p$ частей диэлектрической проницаемости образцов Si в гигагерцовом диапазоне [11]. Поведение ϵ исследовано экспериментально на образцах Si, одного из основных полупроводников микроэлектроники [12–14]. В [12] содержится анализ свойств Si в оптическом и терагерцовом диапазонах; в [13] представлены результаты измерений поглощения при фотовозбуждении в терагерцовом диапазоне в зависимости от частоты; в [14] приведена осциллограмма поглощения при импульсном фотовозбуждении в гигагерцовом диапазоне.

В [9, 15] выдвинута гипотеза о связи фотоиндуцированной ϵ в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах с экситонами, изложен теоретический подход, позволяющий описать и объяснить поведение ϵ , охватывая широкий спектральный диапазон. Вышеуказанные различия в поведении ϵ в разных частотных диапазонах объяснены [9, 15] различным положением частот $f = \omega/2\pi$ наблюдения относительно диапазона $\Delta f_{\text{ax}} = \Delta\omega_{\text{ex}}/2\pi$ частот экситонных (ex) переходов с участием наиболее заселенных экситонных уровней, который находится, как легко получить из данных [16–19], на стыке терагерцового и гигагерцового диапазонов. Представляется необходимым распространить исследования гигагерцовой фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости на полупроводники разных типов в одинаковых условиях с целью определения, проявляется ли экситонный механизм ее образования лишь в некоторых из них, уникальных, или он универсален.

В настоящей работе впервые исследована прямым резонаторным методом динамика действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости ($\text{Re}\epsilon_p$ и $\text{Im}\epsilon_p$) образцов Si и GaAs в гигагерцовом диапазоне в условиях фотовозбуждения с помощью волоконно-лазерного облучения на длине волны $\lambda = 0.97$ мкм с расширением диапазона изменений мощности облучения P от 0 до 1 Вт.

ДИНАМИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ Si И GaAs В ГИГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ

В отличие от традиционного определения комплексной диэлектрической проницаемости

(действительной части $\text{Re}\epsilon$ и мнимой $\text{Im}\epsilon$) по измерениям коэффициентов прохождения и отражения, в настоящей работе использован прямой резонаторный метод [20, 21] применительно к условиям фотовозбуждения, предложенный в [8], определены изменения диэлектрической проницаемости относительно значений при $P = 0$. При измерениях использован волноводный резонатор ($48 \times 24 \times 40$ мм) отражательного типа на частоте 4.7 ГГц. Образец Si в виде полоски $22 \times 4.6 \times 0.55$ мм (или GaAs размерами $24 \times 2 \times 1$ мм) располагали в пучности микроволнового электрического поля E , направленного параллельно ее поверхности. Оптоволокно направляли через отверстие в резонаторе перпендикулярно поверхности образца. Вследствие неоднородности распределения светового излучения измеренные значения фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости являются усредненными по объему.

Качественно не-друдеподобное поведение $\text{Re}\epsilon_p$ легко отличить по сдвигу Δf частоты резонатора с образцом к низким частотам с ростом P . Для количественной оценки измеряли динамику фотоиндуцированной гигагерцовой диэлектрической проницаемости $\delta\text{Re}\epsilon_p$ (относительные изменения), $\Delta\text{Re}\epsilon_p$ (абсолютные изменения) и $\delta\text{Im}\epsilon_p$ (относительные изменения) в Si и GaAs при волоконно-лазерном облучении на длине волны $\lambda = 0.97$ мкм при мощностях $P = 0 \div 1$ Вт (рис. 1).

Для анализа динамики $\text{Re}\epsilon_p$ при фотовозбуждении относительные изменения будем считать согласно $\delta\text{Re}\epsilon_p = (\text{Re}\epsilon_p - 1)/(\text{Re}\epsilon_{p=0} - 1)$:

$$\delta\text{Re}\epsilon_p = [(f - f_p)] / [(f - f_{p=0})]^{-1}, \quad (1)$$

где измеряемые параметры f , $f_{p=0}$, f_p — частоты резонатора без образца, с образцом при $P = 0$ и при P .

Определим также абсолютные изменения $\Delta\text{Re}\epsilon_p = \text{Re}\epsilon_p - \text{Re}\epsilon_{p=0}$:

$$\Delta\text{Re}\epsilon_p = V(f_{p=0} - f_p) / 2fV_{\text{обр}}, \quad (2)$$

V и $V_{\text{обр}}$ — объемы резонатора и образца GaAs (Si) соответственно.

На рис. 1а–1в приведены результаты измерений величин $\delta\text{Re}\epsilon_p$, $\Delta\text{Re}\epsilon_p$ и Δf в зависимости от P : $\Delta f = f_{p=0} - f_p$. При $P = 0$ (в отсутствие облучения) $\delta\text{Re}\epsilon_p = 1$, величина $\Delta\text{Re}\epsilon_p = 0$ и соответственно

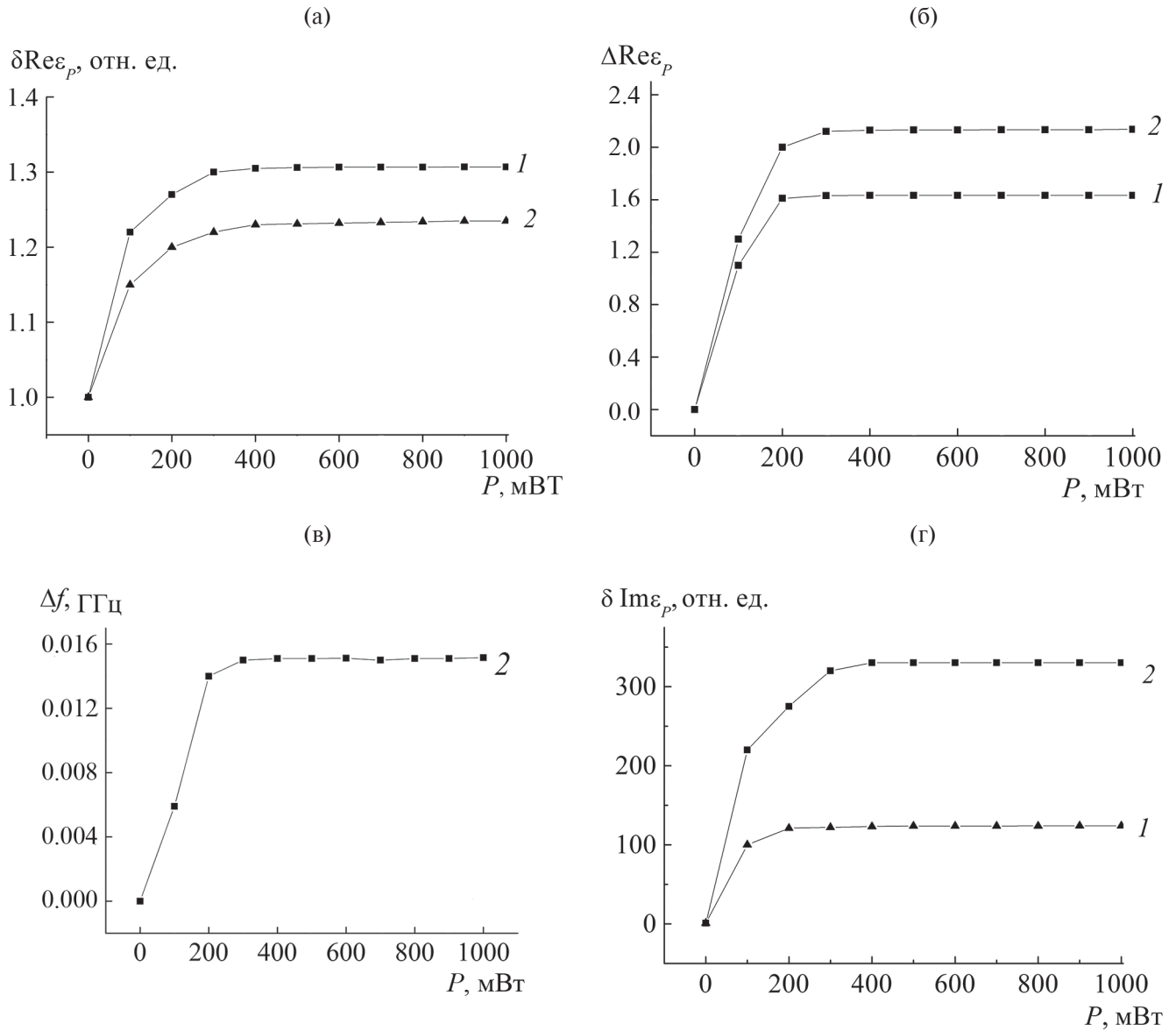


Рис. 1. Измеренная в волноводном резонаторе (4.7 ГГц) динамика диэлектрической проницаемости Si (1) и GaAs (2) в зависимости от мощности оптического облучения P (на длине волны $\lambda = 0.97$ мкм) относительно $P = 0$: а – $\delta \text{Re} \epsilon_p$; б – $\Delta \text{Re} \epsilon_p$; в – Δf ; г – $\delta \text{Im} \epsilon_p$.

$\Delta f = 0$. С ростом P параметры $\delta \text{Re} \epsilon_p$, $\Delta \text{Re} \epsilon_p$ и Δf увеличиваются, приближаясь к насыщению выше 200 мВт, что свидетельствует об увеличении $\text{Re} \epsilon_p$, т.е. об отклонении от модели Друде как для Si, так и для GaAs.

Для анализа динамики $\text{Im} \epsilon_p$ при фотовозбуждении определяем относительные изменения $\delta \text{Im} \epsilon_p = \text{Im} \epsilon_p / \text{Im} \epsilon_{p=0}$:

$$\delta \text{Im} \epsilon_p = \left[\frac{1 + R_p}{1 - R_p} - \frac{1 + R}{1 - R} \right] \left[\frac{1 + R_{p=0}}{1 - R_{p=0}} - \frac{1 + R}{1 - R} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где R , $R_{p=0}$, R_p – измеряемые коэффициенты отражения по напряжению от пустого резонатора, резонатора с образцом при $P = 0$ и при P .

На рис. 1г показано, что с ростом P вплоть до 1 Вт наблюдается увеличение $\delta \text{Im} \epsilon_p$ относительно 1 (при $P = 0$), приблизительно в 100 раз для Si и в 300 – для GaAs, с выходом на насыщение выше 200 мВт. Увеличение $\delta \text{Im} \epsilon_p$ с ростом P соответствует как модели Друде, так и экситонному механизму. В рамках механизма экситонов [9] и при экспериментальном наблюдении [13], в отличие от модели Друде, увеличение $\text{Im} \epsilon$ с ростом P ослабевает по мере удаления f от f_{ex} как в сторону низких, так и высоких частот.

МЕТАСТРУКТУРЫ И ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ОТКЛИКОВ В ГГц-ДИАПАЗОНЕ

Приведем результаты измерений резонансных откликов метаструктур $M1$ и $M2$.

Образец $M1$ представляет собой периодическую решетку параллельных резонансных медных проводов (длина провода решетки 18 мм, ширина 0.1 мм, расстояние между проводами 0.2 мм) в комбинации с ортогонально асимметрично расположенной медной полоской (длина 25 мм и ширина 2 мм) с разрывом, нагруженным пластинкой Si. Такая система является многорезонансной с управляемым одним резонансом, возбуждаемым в медной полоске. Подобные электрически управляемые метаструктуры, нагруженные варактором, предложены в [22], оптически управляемые, нагруженные CdS или CdSe – в [8]. Образец $M1$ располагали вдоль оси прямоугольного волновода (48×24 мм). Оптическое волокно подвели к разрыву в полоске на расстоянии приблизительно 10 мм перпендикулярно поверхности.

На рис. 2 показаны изображения образца $M1$ (рис. 2а) и динамики резонансного отклика медной полоски с пластинкой Si (рис. 2б) в виде резонансной зависимости коэффициента прохождения T микроволнового излучения от его частоты. С ростом P происходит увеличение $T_{\min}$ на резонансной частоте практически до уровня

прозрачности (с приближением к насыщению), сопровождаемое расширением и сдвигом резонансной частоты в сторону низких частот, подобно наблюдаемым ранее с CdS и CdSe в [8]. Это согласуется с ростом $\text{Re}\epsilon_p$ при увеличении P , что также свидетельствует об отклонении от модели Друде.

Метаструктура $M2$ предложена впервые и представляет собой модифицированный полуволновой электрический диполь в виде многозаходной спирали из медных проводов вокруг сердечника из GaAs ($24 \times 2 \times 1$ мм). На рис. 3 представлены изображения оптически управляемого электрического диполя (рис. 3а) и динамики резонансного отклика (рис. 3б), измеренной при расположении диполя в свободном пространстве в разрыве между передающим и приемным прямоугольными волноводами. Из рис. 3б видно, что с ростом P происходит трансформация отклика: увеличение $T_{\min}$ на резонансной частоте (уменьшение интенсивности резонанса практически до уровня прозрачности), сопровождаемое расширением резонанса и сдвигом резонансной частоты в сторону низких частот, аналогично структуре $M1$.

Уменьшение интенсивности резонансного отклика метаструктур с ростом P связано с увеличением мнимой части $\text{Im}\epsilon_p$ диэлектрической проницаемости Si и GaAs, приводящим к ослаблению наведенных резонансных токов в медной полоске образца $M1$ или в медных про-

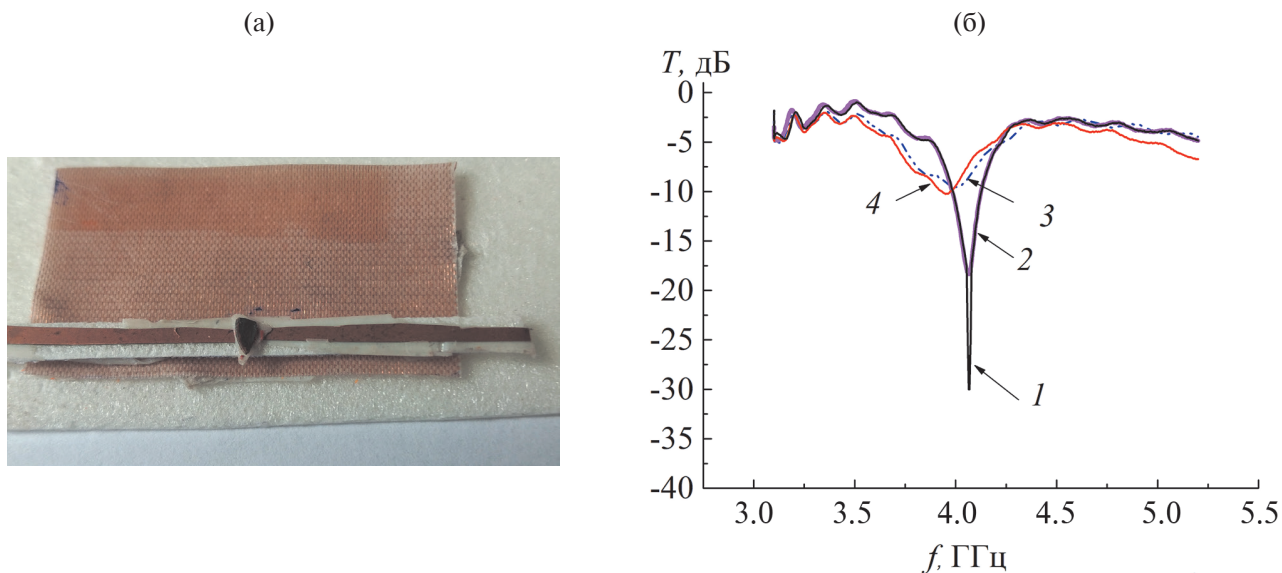


Рис. 2. Метаструктура $M1$ на основе резонансных медных проводов в комбинации с ортогонально и асимметрично расположенной медной полоской 1 с разрывом 2 , нагруженным Si: а – внешний вид; б – резонансный отклик прохождения T медной полоски, измеренный в прямоугольном волноводе с метаструктурой $M1$ при $P = 0$ (1); 80 (2); 550 мВт (3); 1 Вт (4).

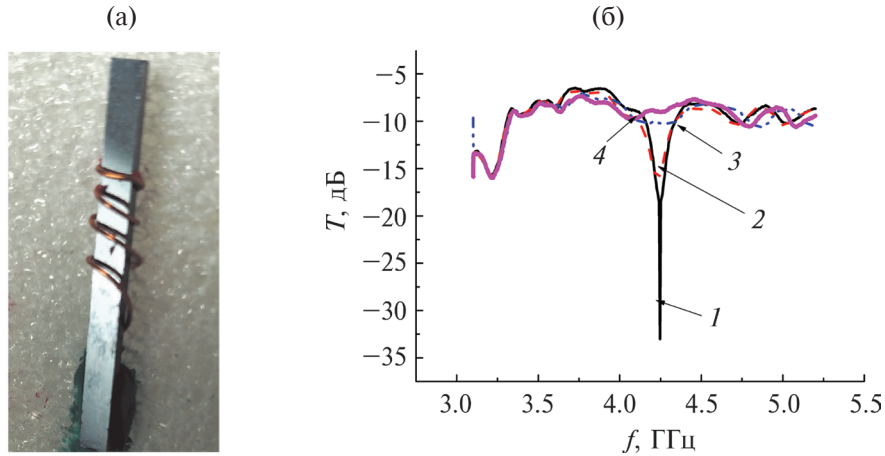


Рис. 3. Электрический полуволновой диполь на основе многозаходной спирали из медных проводов вокруг сердечника из GaAs: а — внешний вид; б — резонансный отклик прохождения T , измеренный в свободном пространстве при $P = 0$ (1); 60 (2); 100 (3); 120 мВт (4).

водах многозаходной спирали образца $M2$. Сдвиг резонанса к низким частотам, наблюдаемый в образцах $M1$ и $M2$, согласуется с увеличением $\text{Re}\epsilon$ образцов Si и GaAs с ростом мощности облучения P и является отклонением от модели Друде и от результатов, полученных в экспериментах с метаматериалами в терагерцовом диапазоне [1–7].

Результаты измерений динамики диэлектрической проницаемости образцов Si и GaAs и откликов разных метаструктур воспроизводились от образца к образцу, свидетельствуя о не-друдеподобном поведении $\text{Re}\epsilon_p$.

О НАСЫЩЕНИИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ГИГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Оценим уровень насыщения. Материальная составляющая диэлектрической проницаемости $\epsilon^{\text{matter}} = \epsilon - 1$ содержит две компоненты: темновую ϵ^{dark} (в отсутствие оптического облучения) и фотоиндуцированную $\epsilon^{\text{p-i}}$. Темновую компоненту связывают [18] с вкладами взаимодействия электромагнитных волн и колебаний связанных (валентных) электронов и ионных остовов решетки: $\epsilon^{\text{dark}} = \epsilon^v + \epsilon^l$. Фотоиндуцированную компоненту можно связать с индуцируемыми светом свободными зарядами ($\epsilon^{\text{p-i}} = \epsilon^{\text{ch}}$) [18] либо с вкладами образующихся под действием света экситонов ($\epsilon^{\text{p-i}} = \epsilon^{\text{ex}}$) [9, 15]. При таком рассмотрении: $\epsilon_p = 1 + \epsilon^{\text{dark}} + \epsilon^{\text{ex}}$, $\epsilon_p = 0 = 1 + \epsilon^{\text{dark}}$, $\Delta\text{Re}\epsilon_p = \text{Re}\epsilon^{\text{ex}}$.

Экситонный вклад [9], вычисленный на основе теоретического подхода [23], представим в виде $\epsilon^{\text{ex}} = \epsilon_p - \epsilon_{p=0} = F^{\text{loc}}\epsilon\eta$, где $F^{\text{loc}} = (\epsilon+2)/3$ —

фактор локального поля, η — экситонная восприимчивость единицы объема без учета различия среднего и локального микроволновых полей:

$$\eta = 8\pi N^{\text{ex}} \sum_{r=1, \dots} \sigma_{rr'} \times \sum_{r'} \frac{|(d_{jj})_{r'r}|^2}{\hbar} \frac{\omega_{r'r} (\omega_{r'r}^2 - \omega^2 + \tau_{r'r}^{-2} + 2i\omega\tau_{r'r}^{-1})}{(\omega_{r'r}^2 - \omega^2)^2 + 2(\omega_{r'r}^2 + \omega^2)\tau_{r'r}^{-2} + \tau_{r'r}^{-4}}, \quad (4)$$

В (4) N^{ex} — концентрация экситонов; $\sigma_{rr'}$ и $\sigma_{r'r'}$ — населенности экситонных уровней r и r' с энергиями E_r , $E_{r'}$; $\omega_{r'r} = (E_r - E_{r'})/\hbar$ — частота перехода между уровнями r' и r ; $\tau_{r'r}$ и $(d_{jj})_{r'r}$ — время поперечной релаксации и матричный элемент оператора дипольного момента экситона для этого перехода.

Из кривых 1 на рис. 1 для кремния при насыщении $\delta\text{Re}\epsilon_p \approx 1.3$, $\Delta\text{Re}\epsilon_p \approx 1.6$. При $\epsilon_p = 0 \approx 10$ фактор локального поля заметно ($\sim$ в 4 раза) увеличивает фотоиндуцированный (экситонный) вклад в ϵ (а саму диэлектрическую проницаемость на 1.6 или на $\sim 16\%$), тогда как восприимчивость, не учитывающая различие локального и среднего полей, доходит до уровня порядка 0.4–0.7.

Заметим, что против признания связи с экситонами наблюдаемого не-друдеподобного поведения гигагерцовой фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости полупроводников можно выдвинуть малость сил осцилляторов экситонов, из-за чего взаимодействие полупроводника с электромагнитным полем недостаточно эффективно для достижения вклада в ϵ порядка 1. По нашему мнению, взаимодействие может быть эффективным, поскольку в нем суммиру-

ются вклады множества осцилляторов каждого экситона: по одному осциллятору на переход в каждой паре уровней, подобно тому, как поляризуемость атома состоит из сил осцилляторов каждой пары уровней [24].

В заключение этого раздела отметим физические процессы, которые в рамках экситонного механизма могут приводить к эффекту насыщения фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости, наблюдаемому в зависимости последней от мощности P светового облучения. В первую очередь, эта зависимость определяется балансом процессов рождения экситонов и их рекомбинации, излучательной или термализационной, через величину концентрации экситонов N^{ex} . Нарастание числа экситонов пропорционально поглощаемой световой мощности, величина которой определяется мощностью света, преодолевшего отражение от границы, и коэффициентом поглощения, связанного с выходом из валентной зоны. Насыщение коэффициента поглощения обусловлено обратным процессом — рекомбинацией — и процессами внутриэкситонной релаксации [25].

Еще один существенный фактор насыщения гигагерцовой фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости — фотоионизация экситонов, состоящая в поглощении световых фотонов с переходами из нижерасположенных дискретных энергетических уровней в состояния непрерывной части спектра. В этом случае населенности дискретных уровней убывают, населенности непрерывного спектра увеличиваются, а рост разности концентраций $N^{\text{ex}}(\sigma_r - \sigma_{r',r})$ экситонов нижних и верхних уровней и их положительного вклада в $\text{Re}\epsilon$ приостанавливается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые измерены относительные δ и абсолютные Δ изменения фотоиндуцированной диэлектрической проницаемости ϵ ($\delta\text{Re}\epsilon_p$, $\Delta\text{Re}\epsilon_p$ и $\delta\text{Im}\epsilon_p$) полупроводников GaAs и Si прямым резонаторным методом в гигагерцовом диапазоне при волоконно-лазерном облучении на длине волн $\lambda = 0.97$ мкм с ростом мощности P от 0 до 1 Вт.

Впервые предложены и реализованы метаструктуры, нагруженные образцами GaAs и Si, и исследована динамика их резонансных откликов при фотовозбуждении.

Обнаружено увеличение $\delta\text{Re}\epsilon_p$ и $\Delta\text{Re}\epsilon_p$ образцов GaAs и Si с ростом P , что согласуется с

динамикой резонансного отклика метаструктур, смещающегося в сторону низких частот, выдвинутой ранее гипотезой об экситонном механизме фотовозбуждения, и является отклонением от модели Друде, предсказывавшей уменьшение.

Обнаружено увеличение $\delta\text{Im}\epsilon$ образцов GaAs и Si приблизительно на два порядка, обуславливающее уменьшение интенсивности резонансного отклика соответствующих метаструктур.

Обнаружено при мощностях P выше 200 мВт насыщение параметров $\delta\text{Re}\epsilon_p$, $\Delta\text{Re}\epsilon_p$ и $\delta\text{Im}\epsilon_p$, наблюдаемое при измерениях в волноводном резонаторе, а также насыщение интенсивности резонансных откликов метаструктур, наблюдаемое при измерениях в волноводе и свободном пространстве. Отмечены связанные с экситонами процессы, определяющие эффект насыщения: фотоионизация экситонов, рекомбинация и внутриэкситонная релаксация.

Результаты свидетельствуют об отклонении от модели Друде и взаимосвязи между явлениями в фотонике и электродинамике в гигагерцовом диапазоне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen H.T., O'Hara J.F., Azad A.K., Taylor A.J. // *Laser Photonics Rev.* 2011. V. 5. Iss. 4. P. 513. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000043>
2. 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>
3. Chen H.T., Padilla W.J., Zide J., Gossard A.C., Taylor A.J., Averitt R.D. // *Nature.* 2006. V. 444. P. 597. <https://www.doi.org/10.1038/nature05343>
4. Xiao S., Wang T., Jiang X., Liu T., Zhou C., Zhang J. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. V. 53. P. 503002. <https://www.doi.org/10.1088/1361-6463/abaced>
5. Manceau J.M., Shen N.-H., Kafesaki M., Soukoulis C.M., Tzortzakis S. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 021111. <https://www.doi.org/10.1063/1.3292208>
6. Zhou J., Chowdhury D.R., Zhao R., Azad A.K., Chen H.-T., Soukoulis C.M., Taylor A.J., Hara J.F. // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 86. № 3. P. 035448. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.035448>
7. Nemati A., Wang Q., Hong M. H., Teng J. H. // *Opto-Electron Advances.* 2018. V. 1. № 18. P.180009. <https://www.doi.org/10.29026/oea.2018.180009>

8. 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://www.doi.org/10.31857/S1234567821210023>
9. Бутылкин В.С., Фишер П.С., Крафтмахер Г.А., Казанцев Ю.Н., Каленов Д.С., Мальцев В.П., Пархоменко М.П. // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 12. С. 1185.
<https://www.doi.org/10.31857/S0033849422120038>
10. Маделунг О. Теория твердого тела. М.: Наука, 1980. 414 с.
11. Rizza C., Ciattoni A., De Paulis F., Orlandi A., Palange E., Colombo L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 135103.
<https://www.doi.org/10.1088/0022-3727/48/13/135103>
12. Рогалин В.Е., Каплунов И.А., Кропотов Г.И. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 851.
<https://www.doi.org/10.21883/OS.2018.12.46951.190-18>
13. Busch S., Scherger B., Scheller M., Koch M. // Optics Lett. 2012. V. 37. № 8. P. 1391.
<https://doi.org/10.1364/OL.37.001391>
14. Мусаев А.М. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 10. С. 1341.
<https://www.doi.org/10.21883/FTP.2017.10.45010.8520>
15. 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://www.doi.org/10.31857/S003384942302002X>
16. Агекян В.Ф. // Соросовский образовательный журн. 2000. Т. 6. № 10. С. 101.
17. Днепровский В.С. // Соросовский образовательный журн. 2000. Т.6. № 8. С. 88.
18. Кашкаров П.К., Тимошенко В.Ю. // Оптика твердого тела и систем пониженной размерности. М.: Физический факультет МГУ, 2009. С. 190.
19. Нокс Р. Теория экситонов. М.: Мир, 1966.
20. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики, М.: Мир, 1965. 675 с.
21. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А. // ФММ. 1989. Т. 67. № 5. С. 902.
22. Kraftmakher G., Butylkin V., Kazantsev Y., Mal'tsev V. // Electron. Lett. 2017. V. 53. № 18. P. 1264.
<https://www.doi.org/10.1049/el.2017.1886>
23. Бутылкин В.С., Каплан А.Е., Хронопуло Ю.Г., Якубович Е.И. Резонансные взаимодействия света с веществом. М.: Наука, 1977.
24. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963, С. 640.
25. Файн В.М. Фотоны и нелинейные среды М.: Сов. Радио, 1972.

Non-Drude-Like Behavior of the Photoinduced Dielectric Permittivity of GaAs and Si in the Gigahertz Range Frequencies

V. S. Butylkin^{1,*}, G. A. Kraftmakher^{1,**}, P. S. Fisher^{1,***}

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino, 141190 Russia

*e-mail: vasebut@yandex.ru,

** e-mail: gaarkr@mail.ru,

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

A non-drude-like behavior of the real part of the photoinduced permittivity $\text{Re}\epsilon_p$ of GaAs and Si samples in the gigahertz range was detected by direct resonator measurements under conditions of fiber-optic irradiation at a wavelength of $\lambda = 0.97$ microns with power changes P in the range of $0 \div 1$ W. It is shown that, in accordance with the hypothesis of the exciton mechanism of the photoinduced microwave dielectric permittivity, $\text{Re}\epsilon_p$ increases with increasing P (approaching saturation above $P = 200$ mW) instead of decreasing within the framework of free charge carriers by Drude. The generality of the behavior of the real parts of the photoinduced permittivity observed in semiconductors of different types (straight-band GaAs and non-straight-band Si) in different electrodynamic systems (waveguides, resonators, metastructures) testifying to the universality of the exciton mechanism is demonstrated. Optically controlled metastructures in the GHz band containing resonant electrically conductive elements loaded with GaAs and Si samples are proposed for the first time: a metastructure based on linear dipoles and a half-wave electric dipole based on a multi-pass spiral. Gigahertz responses of metastructures and the transformation of responses associated with changes in the dielectric permittivity of Si and GaAs during photoexcitation were measured for the first time. Based on the hypothesis put forward about the effect of excitons on photoexcitation, the observed saturation effect of gigahertz photoinduced permittivity is discussed.

Keywords: semiconductor, photoinduced permittivity, gigahertz range, non-drude-like behavior, excitons, waveguides, resonators, metastructures.