

Р. В. Головащенко, В. Н. Деркач, С. И. Тарапов

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: roman.golovashchenko@ire.kharkov.ua

МИКРОВОЛНОВЫЕ ПОТЕРИ В СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ $1\text{ К} < T < 300\text{ К}$. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Разработка и создание новых материалов для микро- и нанoeлектроники неразрывно связаны с проблемой изучения механизмов потерь электромагнитной энергии в новых веществах в гигагерцевом диапазоне частот. Достаточно обоснованной методикой определения этих механизмов служит анализ температурной зависимости тангенса угла потерь таких материалов в диапазоне температур от криогенных до комнатной. В работе на основании экспериментальных данных выполнено феноменологическое моделирование потерь в слабопоглощающих материалах, имеющих алмазоподобную кристаллическую решетку. Эксперименты проведены в диапазонах частот 60...120 ГГц и температур 1...300 К. Использован метод измерения энергетических характеристик дискового диэлектрического резонатора на модах шепчущей галереи. В результате разделены степени проявления основных механизмов потерь в исследованных материалах и определены величины ряда основных физических параметров материалов. Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 41 назв.

Ключевые слова: слабопоглощающие алмазоподобные материалы, микроволновый диапазон, низкие температуры, механизмы потерь.

Исследование поглощения микроволновой энергии в перспективных слабопоглощающих диэлектрических и полупроводниковых материалах имеет большое значение для выяснения основных механизмов потерь в них. Такое изучение открывает возможности определения минимально достижимых величин поглощения энергии, что важно для применения этих материалов в различных областях науки и техники. В частности, появляются возможности определить собственные (решеточные) потери конкретного материала.

Характер изменения поглощения электромагнитной энергии диэлектриками от температуры позволяет проследить вклад различных составляющих потерь. Существует ряд теоретических моделей, которые описывают такие температурные зависимости потерь. Они согласуются с экспериментальными исследованиями, многие из которых относятся к СВЧ-диапазону [1, 2]. Однако в более высокочастотных – гигагерцевом и, тем более, терагерцевом – диапазонах имеющих в литературе данных крайне мало, что явно недостаточно для анализа полной картины, объясняющей механизмы потерь в наиболее востребованных материалах, таких как карбид кремния (SiC), кремний, легированный золотом (Si:Au), CVD-алмаз. Это связано со сложностью экспериментальных методик измерения диэлектрических параметров материалов при низких и сверхнизких температурах и тем, что основное внимание уделялось теоретическому и экспериментальному изучению собственных потерь, без учета несобственных потерь, в частности, обусловленных влиянием примесей в веществе.

В данной работе проведено феноменологическое моделирование температурных зависимостей собственных и несобственных потерь

энергии в микроволновом диапазоне длин волн в слабопоглощающих материалах, имеющих алмазоподобную кристаллическую решетку, на основании экспериментально измеренных значений тангенса угла потерь. Примененная здесь модель основана на представлениях модели [1], апробированной на алюминате лантана LaAlO_3 [1] и фосфиде индия InP [2].

1. Механизмы поглощения микроволновой энергии в слабопоглощающих материалах. Известно, что основными источниками микроволновых потерь в диэлектриках являются собственные (решеточные) и несобственные (примесные) потери [3–6]. Собственные потери связаны с взаимодействием квантов электромагнитного поля с фононами материала. Они соответствуют потерям в идеальной кристаллической решетке материала, обусловлены ее ангармонизмом и определяют низший порог потерь. Эти потери вызваны в основном многоквантовым (разностно-фононным) механизмом потерь [5]. Данные механизмы характеризуются выраженной зависимостью величины тангенса угла потерь высокочастотной энергии в материале от температуры. Несобственные потери, присущие реальным диэлектрическим материалам, в микроволновом диапазоне преимущественно обусловлены дебаевским (дипольно-релаксационным) механизмом потерь, вызванных взаимодействием фотонов с различными дефектами, в том числе диполями, связанными с наличием примесей [1, 3]. Кроме того, незначительный вклад могут давать также и другие механизмы потерь, например, кваздебаевский механизм релаксации фононов [4, 5] и однофононный механизм с возбуждением фонона на частоте возбуждающего фотона [7].

Как правило, в микроволновом диапазоне потери в реальных материалах обуславливаются сразу несколькими механизмами [6, 8, 9], зависящими от температуры. Однако для исследованных здесь материалов потери целесообразно представить в виде суммы двух слагаемых, которые характеризуют традиционно преобладающие механизмы потерь, указанные выше: многоквантовый и дебаевский [1, 2].

Температурную зависимость тангенса угла потерь $\text{tg } \delta_q$, вызванных многоквантовым (или так называемым фононным) механизмом [5], можно определить как [2, 5]

$$\text{tg } \delta_q = AT^p, \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий по определению [5] от свойств материала и не зависящий от температуры; p – величина, характеризующая ангармонизм колебаний, зависящий от вида кристаллической решетки.

Характер зависимости тангенса угла потерь $\text{tg } \delta_{db}$, обусловленных дебаевским механизмом [8, 10], удобнее всего описывать моделью Дебая [1]:

$$\text{tg } \delta_{db} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_r} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon \equiv \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \ll \varepsilon_s$, т. е. $\varepsilon_s \approx \varepsilon_\infty \approx \varepsilon_r$, ε_s и ε_∞ – статическая и высокочастотная (для $\omega\tau \gg 1$) диэлектрические проницаемости; ε_r – диэлектрическая проницаемость при данных частотных и температурных условиях; ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi f$, f – частота. Время релаксации диполей есть $\tau = \tau_0 \exp(W/k_B T)$, где τ_0 – время релаксации диполей при высокой температуре, W – энергия активации релаксации диполей, k_B – постоянная Больцмана. Первый множитель в (2) можно записать как $\Delta\varepsilon/\varepsilon_r = C_1/T$, где C_1 – величина, зависящая от концентрации диполей [2].

Предполагая, что в первом приближении интегральные потери в объекте ($\text{tg } \delta_\Sigma$) являются проявлением лишь двух вышеупомянутых механизмов [1, 2], можно записать следующее выражение, которое используем далее для аппроксимации экспериментальных данных:

$$\text{tg } \delta_\Sigma \approx \text{tg } \delta_q + \text{tg } \delta_{db} \approx FAT^p + (1-F) \frac{C_1}{T} \frac{\omega\tau}{\omega^2\tau^2}, \quad (3)$$

где в отличие от модели [1] нами введен коэффициент F , характеризующий вклад каждого механизма потерь, $0 \leq F \leq 1$.

При аппроксимации по (3) полученных экспериментальных данных в качестве итерационного алгоритма использован метод Левенберга – Марквардта [11]. Диапазон изменения значений A

и p в (1) выбран, исходя из теории [5], а диапазон τ_0 , W , C_1 в (2) – на основании работ [1, 2]. Величина F принята равной 0,5.

2. Методика эксперимента. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, полученные с использованием одного из наиболее точных методов измерения диэлектрических параметров материалов с малыми диэлектрическими потерями в миллиметровом диапазоне волн – метода измерения энергетических характеристик дискового диэлектрического резонатора (ДДР) на модах шепчущей галереи (МШГ) [12–14]. Дисковые диэлектрические резонаторы изготовлены из исследуемых материалов с оптической точностью в форме дисков, имеющих диаметр в несколько длин волн и высоту, равную примерно половине длины волны в материале. Перед проведением эксперимента поверхности резонаторов тщательно очищались.

В качестве рабочих выбраны моды $EH_{mn\delta}$ с большим значением индекса m ($m = 20 \dots 36$), где m , n , δ – азимутальный, радиальный и аксиальный индексы соответственно. При соблюдении условий слабой связи ДДР и возбуждающих волноводов дифракционные потери пренебрежимо малы, добротность такого резонатора близка к собственной и определяется в основном потерями в самом материале резонатора [12]. При этом тангенс угла потерь в материале резонатора $\text{tg } \delta_\Sigma$ можно записать как [13, 16]

$$\text{tg } \delta_\Sigma \approx 1/Q_0, \quad (4)$$

где Q_0 – собственная добротность ДДР.

Данный метод, обеспечивающий высокую точность (< 5 %) для определения $\text{tg } \delta_\Sigma$, удобен для использования в миллиметровом диапазоне длин волн, поскольку ДДР может быть помещен в криогенную систему [15], имеющую небольшие размеры. Криогенная часть электродинамического модуля [16] с исследуемым образцом представлена на рис. 1. Измерены амплитудно-частотные характеристики и добротности резонаторов, изготовленных из исследуемых материалов, в широкой области температур, и рассчитан тангенс угла потерь в зависимости от температуры.

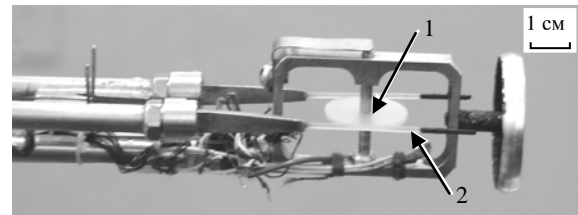


Рис. 1. ДДР в электродинамическом модуле криодиэлектронметра: 1 – ДДР; 2 – возбуждающие волноводы

Исследования проведены на криоэлектронном измерителе, входящем в состав Криомагнитного радиоспектроскопического комплекса миллиметрового диапазона длин волн, являющегося научным объектом, имеющим статус Национального достояния Украины [17].

3. Результаты экспериментов и моделирования. Наиболее интересным классом материалов, имеющих наименьшие потери в гигагерцевом и терагерцевом диапазонах частот, являются монокристаллические материалы с алмазоподобной кристаллической решеткой (Ge, Si, InP, GaP, кремний, легированный золотом (Si: Au)) и собственно искусственные алмазы (CVD-алмазы), полученные методом химического осаждения из паровой фазы [9, 18–22]. Материалы, относящиеся к алмазоподобным структурам, характеризуются кристаллической решеткой, аналогичной решетке алмаза. Схожесть кристаллических структур приводит к тому, что в веществах такого типа есть ряд общих свойств (высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения материала, низкие микроволновые потери, высокая твердость) [18, 23].

Вообще говоря, Ge и Si являются элементарными полупроводниками с алмазоподобной кристаллической решеткой [24]. Однако при низких температурах они ведут себя как диэлектрики благодаря вымораживанию примесных уровней (см., например, [25, 26]). То же относится к InP и GaAs, являющимся типичными полупроводниками, имеющими решетку типа цинковой обманки,

сходной со структурой алмаза [27]. Кремний, легированный золотом, содержит акцепторные и донорные уровни Au, существенно влияющие на концентрацию свободных носителей заряда [28]. Нами исследовались высокоомные образцы материалов, в которых влияние потерь на проводимость мало в миллиметровом диапазоне частот при учете суммарных потерь в материале [29, 30]. Следует отметить, что характерным для исследованных материалов является то, что на зависимости $\text{tg } \delta_{\Sigma} = f(T)$ наблюдается четко выраженный экстремум несобственных потерь в области криогенных температур, как видно из представленных в работе результатов.

Перечень исследованных материалов и размеры ДДР, изготовленных из этих материалов, приведены в табл. 1. Значения величин, входящих в (3), которые определены при аппроксимации экспериментальных данных для перечисленных образцов, указаны в табл. 2.

Таблица 1
Геометрические параметры исследованных образцов

Материал	Диаметр d , мм	Высота h , мм
Кремний Si	20,00	1,45
Германий Ge	20,00	0,80
Фосфид индия InP	12,14	1,03
Арсенид галлия GaAs	13,85	2,53
Кремний, легированный золотом Si: Au	15,30	1,58
CVD-алмаз	20,06	0,34

Таблица 2
Параметры (3) для исследованных образцов

Параметр	Ge	Si	InP	InP ($f \approx \approx 11$ ГГц) [2]	GaAs	CVD-алмаз	Si: Au
Коэффициент пропорциональности, A	$3,971 \cdot 10^{-7}$	$2,373 \cdot 10^{-7}$	$3,940 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$1,407 \cdot 10^{-13}$	$2,771 \cdot 10^{-5}$	$3,241 \cdot 10^{-6}$
Величина, характеризующая ангармонизм колебаний кристаллической решетки, p	1,706	2,01	1,93	2,6	4,67	0,319	0,287
Время релаксации диполей, τ_0 , с	$2,163 \cdot 10^{-13}$	$1,624 \cdot 10^{-14}$	$2,811 \cdot 10^{-10}$	$4,15 \cdot 10^{-12}$	$5,915 \cdot 10^{-13}$	$2,344 \cdot 10^{-10}$	$4,094 \cdot 10^{-10}$
Энергия активации диполей, W , эВ	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,669 \cdot 10^{-4}$	$1,657 \cdot 10^{-4}$
Величина, зависящая от концентрации диполей, C_1	$2,621 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$	$9,95 \cdot 10^{-4}$	$3,576 \cdot 10^{-4}$	$6,674 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$

Образцы Ge (рис. 2, а) и Si (рис. 2, б) характеризуются сравнительно малыми потерями в области температур $T = 4,2 \dots 20$ К: $\text{Ge} - \text{tg } \delta_{\Sigma} > 2 \cdot 10^{-5}$, $\text{Si} - \text{tg } \delta_{\Sigma} \approx (2 \dots 15) \cdot 10^{-5}$. Как видно из рисунков, для обоих образцов характерно появление экстремума на монотонно возрастающей зависимости $\text{tg } \delta_{\Sigma} = f(T)$:

$\text{tg } \delta_{\Sigma} \approx 3,15 \cdot 10^{-5}$ при $T \approx 6,5$ К (Ge) и $\text{tg } \delta_{\Sigma} \approx 9 \cdot 10^{-5}$ при $T \approx 11$ К (Si).

Из рис. 2 с учетом результатов аппроксимации, приведенных в табл. 2, видно, что у обоих образцов в области низких температур ($T < 20$ К) преобладающим становится дебаевский механизм потерь, выраженный существенно

более явно в Si по сравнению с Ge. Более высокая температура, при которой наблюдается экстремум потерь в Si, наиболее вероятно, вызвана увеличением энергии активации (табл. 2), согласно (2).

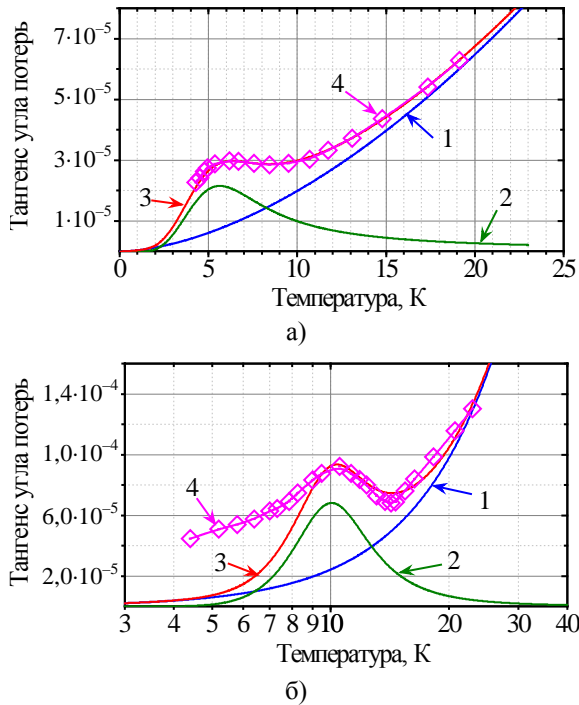


Рис. 2. Зависимость тангенса угла потерь от температуры (1 – согласно (1), 2 – согласно (2), 3 – согласно (3), 4 – экспериментальные данные): а) для Ge; б) для Si

При $T > 10$ K у образцов наблюдается степенная зависимость потерь от температуры, описываемая (1), показатель p в которой отличается у разных образцов. Так, достаточно хорошее совпадение аппроксимации экспериментальных данных с помощью выражения (3) достигается у Ge при $p \approx 1,7$ и у Si при $p \approx 2$. Как и следовало ожидать, величины p относительно сравнимы из-за схожести кристаллических решеток Ge и Si. Из рис. 2 также следует, что с ростом температуры выраженным становится многоквантовый механизм потерь.

Исследуемые образцы двухкомпонентных полупроводников InP и GaAs (рис. 3) обладают весьма малыми потерями ($\text{tg } \delta_{\Sigma} \approx 1 \cdot 10^{-5}$) в довольно широкой области температур (1...60 K), которые слабо увеличиваются с ростом температуры. Хорошее согласование между моделью и экспериментом позволило определить основные параметры этих двух объектов (табл. 2). Видно, что образец InP обладает существенно большим по сравнению с GaAs временем релаксации диполей (т. е. величиной τ_0). Следовательно, полученные величины параметров согласно (2) обуславливают расширение температурного диапа-

зона проявления дебаевского механизма потерь в InP ($1 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$). Большая величина p в образце GaAs по сравнению с InP свидетельствует, наиболее вероятно, о преобладании многоквантового механизма потерь в области $T > 30 \text{ K}$. В табл. 2 также приведено сравнение параметров аппроксимации для исследованного нами образца InP и для образца InP из работы [2]. Разница этих параметров, на наш взгляд, обусловлена прежде всего наличием примесей.

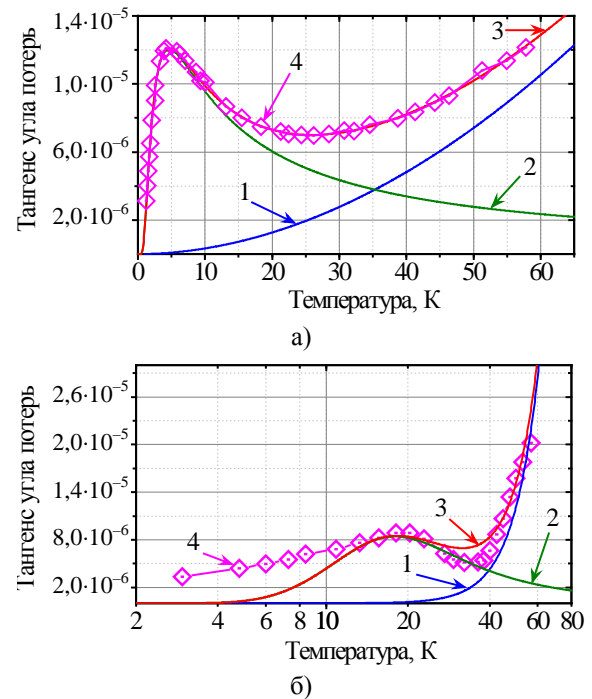


Рис. 3. Зависимость тангенса угла потерь от температуры (1 – согласно (1), 2 – согласно (2), 3 – согласно (3), 4 – экспериментальные данные): а) для InP; б) для GaAs

Наиболее интересные данные получены при исследовании поликристаллического CVD-алмаза (образец изготовлен в ИОФ РАН [31]) и кремния, легированного золотом (Si:Au). CVD-алмаз, как известно [22], обладает широкой запрещенной зоной, поэтому примесные уровни должны бы играть здесь меньшую роль. Однако измеренная нами величина потерь и характер их зависимости от температуры на частотах вблизи 75 и 112 ГГц указывают на значительную роль примесей, визуализируемых в оптическом диапазоне. Так, на рис. 4 приведена зависимость потерь в CVD-алмазе от температуры в области $T = 1 \dots 300 \text{ K}$ на частотах вблизи 112 ГГц. Зависимость имеет широкий экстремум вблизи $T \approx 2 \text{ K}$ при изменении $\text{tg } \delta_{\Sigma}$ от $1,7 \cdot 10^{-4}$ до $1,3 \cdot 10^{-4}$. Этот экстремум, наиболее вероятно, вызван примесями («неалмазными включениями»), образующимися в ходе изготовления образца, и свидетельствует о преобладании несобственных потерь в образце.

Следует отметить существенное различие полученного нами значения параметра p с теоретической оценкой [5]. Несмотря на это расхождение, наши экспериментальные данные при $77\text{ K} < T < 300\text{ K}$ ($p=0,319$) хорошо совпадают с данными других экспериментаторов [32] ($p=0,329$).

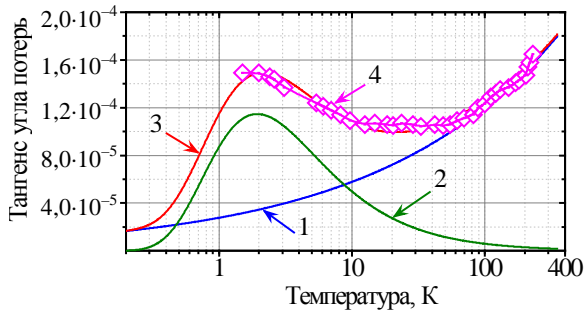


Рис. 4. Зависимость тангенса угла потерь от температуры (1 – согласно (1), 2 – согласно (2), 3 – согласно (3), 4 – экспериментальные данные) для CVD-алмаза

Еще одним объектом, представляющим большой интерес для микроволновой физики, является кремний, легированный золотом – Si:Au. Так, в [18, 20] показано, что для Si:Au значения потерь, полученные экспериментально, приближаются к нижнему теоретическому пределу при комнатной температуре. Этот предел обусловлен проводимостью образца, связанной со свободными носителями заряда в кремнии [18].

Результаты анализа потерь в образце Si:Au приведены на рис. 5. Заметим, что среди исследованных нами материалов он обладает наименьшими потерями электромагнитной энергии ($\text{tg } \delta_{\Sigma} \approx 8 \cdot 10^{-6}$) в широкой области температур, вплоть до очень низких, $T < 1\text{ K}$. Большие времена релаксации диполей у образцов Si:Au и CVD-алмаза, сравнимые с временем у InP, свидетельствуют о менее выраженном влиянии примесного состава на свойства образцов.

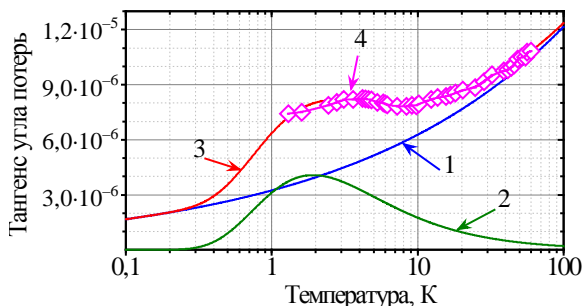


Рис. 5. Зависимость тангенса угла потерь от температуры (1 – согласно (1), 2 – согласно (2), 3 – согласно (3), 4 – экспериментальные данные) для Si:Au

Об этом свидетельствует и вид зависимости потерь с изменением температуры, в частно-

сти, по показателю p схожий у Si:Au и CVD-алмаза. По-видимому, у Si:Au вследствие слабого изменения зависимости потерь от температуры преобладающее влияние на ее вид оказывают лишь примеси Au.

В табл. 3 приведены обобщенные на основании полученных экспериментальных данных и теоретических оценок [5, 33, 34] значения показателя p , характеризующего многоквантовый механизм собственных потерь (1). В таблице центросимметричная структура решетки материала обозначена как ЦС, нецентросимметричная структура – НЦС.

Из табл. 3 видно, что у исследованных образцов показатель p имеет отклонения от низкотемпературной оценки. Можно предположить, что у материалов, имеющих невысокую температуру Дебая T_D [35], величина p находится между пределами теоретических приближений [33, 34]. Так, например, у InP экспериментально полученная величина $p \approx 1,93$ находится в пределах оценок $1 < p < 3$. КвазиДебаевский механизм потерь, характерный для материалов с НЦС [5], также может оказывать влияние на форму экстремума температурной зависимости потерь. Кроме того, как указывалось в [5, 33, 34], соотношение частоты релаксации фононов и микроволновой частоты существенно влияет на теоретическое определение величины показателя p .

В дополнение к этому, отклонения между теоретическими и экспериментальными результатами могут быть связаны с вкладом несобственных потерь, оказывающих существенное влияние на ход температурной зависимости потерь в полупроводниках. Как отмечалось в ряде работ [20, 25, 26, 36], в которых подобные материалы исследованы на частотах вблизи 20 и 150 ГГц, это связано с сильным влиянием энергетических уровней примесей и свободных носителей заряда на результирующую величину потерь.

Заметим, что все эти факторы сказываются на том, что величина измеренных потерь в исследованных образцах (кроме Si:Au) превышает теоретическую оценку потерь не менее чем на порядок [9, 18]. Используемая нами методика моделирования позволяет достаточно хорошо (на конкретной частоте электромагнитных колебаний) связать величину потерь в ряде слабопоглощающих алмазоподобных материалов с параметрами электрически активных примесей.

Как видно из табл. 4, при сравнении величин p , полученных при аппроксимации наших экспериментальных данных и экспериментальных данных [2, 20, 25, 32, 36, 38], полученных на частотах f вблизи диапазона частот, используемого нами для проведения исследований, наблюдается хорошее совпадение p у CVD-алмаза. Наряду с этим, у полупроводников Si:Au, Si, InP и GaAs

различие величин p оказывается существенно бóльшим.

Это, наиболее вероятно, обусловлено несобственными потерями, вносящими значительное влияние в общий вид температурной зависимости потерь в полупроводниковых монокристаллических образцах на разных участках температурного диапазона, как отмечалось выше.

Для получения более определенных значений p необходимо проведение измерений образцов при температурах, превышающих 300 К [39–41]. Кроме того, чтобы более корректно сравнивать наши результаты с данными экспериментов других авторов, проведенных при иных частотах (табл. 4), желательно также учитывать зависимость потерь от частоты [26].

Таблица 3

Сравнение величин T^p для многоквантового механизма поглощения с данными теории (для кубической кристаллической системы)

Образец	Тип решетки	Температура Дебая, T_D , К [35]	Высокотемпературная оценка потерь, при $T > T_D$ [34]	Низкотемпературная оценка потерь, при $T < T_D$ [33]	Выражение многоквантового поглощения T^p (1) в данной работе
Ge	ЦС	380	$\omega^2 T^2$	$\omega^2 T^4$	$T^{1,7}$
Si	ЦС	645	$\omega^2 T^2$	$\omega^2 T^4$	T^2
InP	НЦС	302	ωT	ωT^3	$T^{1,92}$
GaAs	НЦС	344	ωT	ωT^3	$T^{4,67}$
Si:Au	ЦС	–	ωT	ωT^3	$T^{0,29}$
CVD-алмаз	ЦС	2240	ωT	ωT^3	$T^{0,32}$

Таблица 4

Сравнение параметров A и p (3) с учетом данных [2, 20, 25, 32, 36, 38] для исследуемых материалов

Образец	Si			InP		GaAs		CVD-алмаз		Si:Au	
	Аппроксимация по (3)*	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 20$ ГГц [25]**	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 20$ ГГц [36]**	Аппроксимация по (3)*	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 11$ ГГц [2]	Аппроксимация по (3)*	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 20$ ГГц [38]**	Аппроксимация по (3)*	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 22$ ГГц [32]	Аппроксимация по (3)*	Аппроксимация эксперимента на $f \approx 150$ ГГц [20]**
A	$2,37 \cdot 10^{-7}$	$4,20 \cdot 10^{-10}$	$8,35 \cdot 10^{-12}$	$3,94 \cdot 10^{-9}$	$2,40 \cdot 10^{-10}$	$1,41 \cdot 10^{-13}$	$9,15 \cdot 10^{-9}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$5,33 \cdot 10^{-7}$
p	2,01	5,0	5,6	1,927	2,6	4,67	1,9	0,320	0,329	0,287	0,627

* – результаты данной работы;

** – выполнено авторами данной работы.

Выводы. Таким образом, на основании разработанной феноменологической модели и экспериментальных данных в диапазоне частот 60...120 ГГц и в области температур 1...300 К разделены степени проявления основных механизмов потерь электромагнитной энергии в ряде алмазоподобных материалов. Результаты феноменологического моделирования основаны на экспериментальном исследовании энергетических характеристик ДДР на МШГ. Определен ряд физических параметров исследованных алмазоподобных материалов. Показано, что несобственные потери, обусловленные дебаевским механизмом, существенно определяют вид температурных характеристик потерь в таких материалах.

Авторы работы выражают благодарность Б. М. Гарину, В. В. Паршину, В. Г. Ральченко за предоставленные для исследования образцы.

Работа выполнена при частичном финансировании Президиума Национальной академии наук Украины в рамках проекта «Диэлектрометрия алмазоподобных материалов в гигагерцевом и терагерцевом диапазонах частот электромагнитных волн и широком диапазоне температур» (НИР «Диамант») (договоры № 18-02-14 от 22.04.2014 г. и № 18-02-14 от 30.04.2015 г.).

Библиографический список

1. *Microwave absorption in single crystals of lanthanum aluminate* / C. Zuccaro, M. Winter, N. Klein, K. Urban // J. Appl. Phys. – 1997. – 82, N 11. – P. 5695–5704.
2. *Krupka J. Permittivity and microwave absorption of semi-insulating InP at microwave frequencies* / J. Krupka, J. G. Hartnett, M. Piersa // Appl. Phys. Lett. – 2011. – 98, N 11. – P. 112112 (3 p.).
3. *Молчанов В. І. Основи мікрохвильової електроніки* / В. І. Молчанов, Ю. М. Поплавко. – К.: НТТУ «КПІ», 2010. – 351 с.

4. Гуревич В. Л. Кинетика фоновых систем / В. Л. Гуревич. – М.: Наука, 1980. – 400 с.
5. Gurevich V. L. Intrinsic dielectric loss in crystals / V. L. Gurevich, A. K. Tagantsev // *Advances in Physics*. – 1991. – 40, N 6. – P. 719–767.
6. Tagantsev A. Mechanisms of dielectric loss in microwave materials / A. Tagantsev // *Mat. Res. Soc. Proc.* – 1999. – 603. – P. 221–232.
7. Garin B. M. Disorder-induced one-phonon absorption of millimeter and submillimeter waves / B. M. Garin // *Proc. of SPIE*. – 1994. – 2211. – P. 606–614.
8. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков / Ю. М. Поплавко. – К.: Вища шк., 1980. – 400 с.
9. Garin B. M. Lower loss limits at millimeter and terahertz ranges / B. M. Garin // *Joint 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics: Digest of Conf.* – Willamsburg, 2004. – P. 393–394.
10. Фрелих Г. Теория диэлектриков / Г. Фрелих; пер. с англ. Г. И. Сканава. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 251 с.
11. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер. с англ. под ред. А. А. Петрова. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
12. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак // *Ин-т радиофизики и электрон. им. А. Я. Усикова НАН Украины*. – К.: Наук. думка, 2008. – 296 с.
13. Use of whispering-gallery modes for complex permittivity determinations of ultra-low-loss dielectric materials / J. Krupka, K. Derzakowski, A. Abramowicz et al. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1999. – 47, N 6. – P. 752–759.
14. Измерение диэлектрических параметров материалов при низких температурах в миллиметровом диапазоне длин волн / В. Н. Деркач, Р. В. Головащенко, Е. В. Горощко и др. // *Сб. науч. работ ФМИ НАН Украины. Сер. Физические методы и средства контроля качества материалов и изделий*. – Львов, 2005. – Вып. 10. – С. 149–158.
15. Дискковый диэлектрический резонатор для низкотемпературных магниторезонансных исследований в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / Т. В. Багмут, В. Н. Деркач, Р. В. Головащенко и др. // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / *Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины*. – Х., 2007. – 12, № 2. – С. 421–425.
16. Головащенко Р. В. Система возбуждения дисккового диэлектрического резонатора в криодиэлектронметре / Р. В. Головащенко // *Радиофизика и электрон.* – 2010. – 1(15), № 2. – С. 27–31.
17. Криомагнітний радіоспектроскопічний комплекс міліметрового діапазону довжин хвиль / *Experimental Complex – National Treasure of Ukraine* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.ire.kharkov.ua/Radiospectroscopy/1.htm](http://www.ire.kharkov.ua/Radiospectroscopy/1.htm). – Загл. с экрана.
18. О диэлектриках с минимальными потерями в субмм и мм диапазонах / Б. М. Гарин, А. П. Копнин, В. В. Мериакри и др. // *Укр. симп. «Физика и техника мм и субмм радиоволн»*: тез. докл. – Х., 1991. – Ч. I. – С. 86–87.
19. Метод создания кремния с экстремально низкими потерями в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн / Б. М. Гарин, А. Н. Копнин, М. П. Пархоменко и др. // *Письма в журн. техн. физики*. – 1994. – 20, № 21. – С. 56–59.
20. Кремний с минимальными диэлектрическими потерями в миллиметровом диапазоне длин волн / Б. А. Андреев, Т. В. Котерева, В. В. Паршин и др. // *Неорганические материалы*. – 1997. – 33, № 11. – С. 1301–1304.
21. О потерях в алмазе в миллиметровом диапазоне / Б. М. Гарин, В. В. Паршин, В. Г. Ральченко и др. // *Письма в журн. техн. физики*. – 1999. – 25, вып. 7. – С. 85–89.
22. Chemical vapour deposition synthetic diamond: Materials, technology and applications / R. S. Balmer, J. R. Brandon, S. L. Clewes et al. // *J. Phys. Condensed Matter*. – 2009. – 21, N 36. – Paper. 364221.
23. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers / M. Thumm / *Karlsruhe Institute of Technology // Kit Scientific Reports 7641*. – KIT Scientific Publishing, 2012. – 144 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.ubka.uni-karlsruhe.de](http://www.ubka.uni-karlsruhe.de). – Загл. с экрана.
24. Шалимова К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
25. Measurements of permittivity, dielectric loss tangent, and resistivity of float-zone silicon at microwave frequencies / J. Krupka, J. Breeze, A. Centeno et al. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – 54, N 11. – P. 3995–4000.
26. Silicon as an advanced window material for high power gyrotrons / V. V. Parshin, R. Heindinger, B. A. Andreev et al. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. – 1995. – 16, N 5. – P. 863–877.
27. Зеегер К. Физика полупроводников / К. Зеегер; пер. с англ. под ред. Ю. К. Пожела. – М.: Мир, 1977. – 616 с.
28. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / А. Милнс; пер. с англ. под ред. М. К. Шейнкмана. – М.: Мир, 1977. – 512 с.
29. Поплавко Ю. М. Параметры полупроводников на микроволнах / Ю. М. Поплавко, В. А. Казмиренко // 23-я междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 750–751.
30. Krupka J. Microwave and RF methods of contactless mapping of the sheet resistance and the complex permittivity of conductive materials and semiconductors / J. Krupka, D. Nguyen, J. Mazierska // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – 22, N 8. – Paper 085703.
31. Поликристаллический CVD-алмаз – новый диэлектрический материал для СВЧ-электроники / В. Г. Ральченко, В. И. Конов, В. В. Паршин и др. // 13-я междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2003): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 547–548.
32. Electromagnetic properties of polycrystalline diamond from 35 K to room temperature and microwave to terahertz frequencies // J.-M. L. Floch, R. Vara, J. G. Hartnett et al. // *J. Appl. Phys.* – 2011. – 109, N 9. – Paper 094103. – 6 p.
33. Гуревич В. Л. О собственных диэлектрических потерях в кристаллах. Низкие температуры / В. Л. Гуревич, А. К. Таганцев // *Журн. эксперим. и теорет. физики*. – 1986. – 91, № 1(7). – С. 245–261.
34. Гуревич В. Л. О собственных диэлектрических потерях в кристаллах. Высокие температуры / В. Л. Гуревич, А. К. Таганцев // *Журн. эксперим. и теорет. физики*. – 1990. – 97, № 4. – С. 1335–1345.
35. Tropic W. J. Properties of Crystals and Glasses / W. J. Tropic, M. E. Thomas, T. J. Harris // *Handbook of Optics* / Ed. Michael Bass. – McGraw-Hill, 1995. – 2, Ch. 33 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://photonics.intec.ugent.be/education/ivpv/res_handbook/v2ch33.pdf](http://photonics.intec.ugent.be/education/ivpv/res_handbook/v2ch33.pdf). – Загл. с экрана.
36. Microwave losses of undoped n-type silicon and undoped 4H-SiC single crystals at cryogenic temperatures / H. S. Jung, W. I. Yang, M. S. Cho et al. // *Electronic Materials Letters*. – 2014. – 10, N 3. – P. 541–549.
37. Шкловский Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
38. Use of whispering-gallery modes and quasi-TE_{0np} modes for broadband characterization of bulk gallium arsenide and gallium phosphide samples / J. Krupka, D. Mouneyrac, J. G. Hartnett, M. E. Tobar // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. – 56, N 5. – P. 1201–1206.
39. Ильченко В. С. Собственные СВЧ диэлектрические потери в alpha-Al₂O₃ при 300 – 1000 К / В. С. Ильченко // *Физика твердого тела*. – 1989. – 31, № 7. – С. 135–138.
40. Диэлектрические потери в CVD-алмазах в миллиметровом диапазоне длин волн при температурах 300 – 900 К / В. В. Паршин, Б. М. Гарин, С. Е. Мясникова, А. В. Орленков // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2004. – 47, № 12. – С. 1087–1095.

41. *Dielectric loss at millimeter range and temperatures 300 – 950 K, and electrophysical properties in diamonds grown by the arc plasma jet technology* / В. М. Гарин, В. И. Полиakov, А. И. Руквишников et al. // PIERS 2014: Proc. – Guangzhou, 2014. – P. 2096–2099 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://piers.org/piersproceedings/piers2014Guangzhou.php](http://www.URL: http://piers.org/piersproceedings/piers2014Guangzhou.php). – Загл. с экрана.

Рукопись поступила 10.09.2015.

R. V. Golovashchenko, V. N. Derkach, S. I. Tarapov

MICROWAVE LOSS IN LOW-ABSORBING
DIAMOND-LIKE MATERIALS
AT $1\text{ K} < T < 300\text{ K}$.
THE PHENOMENOLOGICAL SIMULATION

The development and manufacture of new materials for micro- and nanoelectronics are inextricably linked with the problem of studying the electromagnetic energy loss mechanisms in these materials in the gigahertz band. The reasonable technique of search for these mechanisms is the analysis of the temperature dependence of the loss tangent of such materials at temperatures from cryogenic ones to room ones. In this paper, the phenomenological simulation of loss in low-absorbing materials having a diamond-like crystal lattice is performed on the basis of experimental data. The experiments were carried out in the frequency range 60...120 GHz and at temperatures 1...300 K. The technique of measuring energy characteristics of the whispering gallery mode disk dielectric resonator is applied. As a result, the roles of main loss mechanisms for the materials under research are clari-

fied and the values of basic physical parameters of materials are determined.

Key words: low-absorbing diamond-like materials, microwave waveband, low temperatures, loss mechanisms.

Р. В. Головащенко, В. М. Деркач, С. И. Тарапов

МІКРОХВИЛЬОВІ ВТРАТИ
У СЛАБОПОГЛИНАЮЧИХ
АЛМАЗОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛАХ
ПРИ $1\text{ K} < T < 300\text{ K}$.
ФЕНОМЕНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розробка і створення нових матеріалів для мікро- та наноелектроніки нероздільно пов'язані з проблемою вивчення механізмів втрат електромагнітної енергії в нових речовинах у гігагерцевому діапазоні частот. Достатньо обгрунтованою методикою визначення цих механізмів є аналіз температурної залежності тангенса кута втрат таких матеріалів у діапазоні температур від криогенних до кімнатної. У роботі на підставі експериментальних даних виконано феноменологічне моделювання втрат у слабопоглинаючих матеріалах, що мають алмазоподібну кристалічну ґратку. Експерименти проведено у діапазонах частот 60...120 ГГц і температур 1...300 К. Використано метод вимірювання енергетичних характеристик дискового діелектричного резонатора на модах шепочучої галереї. У результаті розділено ступені прояву основних механізмів у досліджених матеріалах та визначено величини низки основних фізичних параметрів матеріалів.

Ключові слова: слабопоглинаючі алмазоподібні матеріали, мікрохвильовий діапазон, низькі температури, механізми втрат.