

05;09

О потерях в алмазе в миллиметровом диапазоне

© Б.М. Гарин, В.В. Паршин, В.Г. Ральченко, В.И. Конов,
А.Н. Копнин, А.Б. Мазур, М.П. Пархоменко, Е.Е. Чигряй

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино, Московская обл.
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Центр естественно-научных исследований
Института общей физики РАН, Москва

Поступило в Редакцию 19 мая 1998 г.

Теоретически и экспериментально исследованы величины и природа диэлектрических потерь в малопоглощающих синтетических алмазах в диапазоне длин волн 1.75–6.8 мм при температурах $T = 20–500^\circ\text{C}$. В некоторых образцах наблюдались крайне малые потери ($\text{tg } \delta < 10^{-5}$), что делает плазмохимически осажденные алмазные пластины применимыми для создания окон непрерывных гиротронов мегаваттной мощности. Показана принципиальная возможность дальнейшего значительного снижения потерь.

Прогресс в технологии синтеза поликристаллических алмазных пленок методом осаждения из газовой фазы и создание алмазных пластин большого диаметра (5–10 см) и толщины до 1–2 мм открывает возможности измерений малых диэлектрических потерь в алмазах в диапазоне миллиметровых (ММ) волн, а также создания алмазных окон для мощных источников излучения ММ волн — гиротронов. В [1,2] было теоретически предсказано, что в кристаллах со структурой решетки типа алмаза в диапазоне ММ и субмиллиметровых волн можно ожидать крайне малые собственные решеточные потери (СРП), соответствующие идеальному кристаллу и определяющие теоретический предел уменьшения потерь. При этом алмаз среди них характеризуется наименьшими величинами теоретических пределов уменьшения как решеточных потерь, так и потерь, обусловленных свободными носителями заряда [2,3].

Имеются результаты измерений потерь в синтетических алмазах в ММ диапазоне [4–6], а также при более низких частотах [7]. Однако практически не исследованы температурно-частотные зависимости, не

выявлена природа, не изучено влияние условий синтеза алмазов на величины потерь и возможности их значительного уменьшения. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

В [2,3] получены грубые теоретические оценки абсолютных величин СРП в алмазе, кремнии и германии соответственно: $\text{tg } \delta \sim 10^{-9}$, $3 \cdot 10^{-8}$ и $2 \cdot 10^{-7}$ на волне $\lambda = 2 \text{ mm}$ при комнатной температуре. Из сопоставления с экспериментальными данными о рекордно низких потерях в кремнии, компенсированном золотом (Si:Au) [3,8], можно получить, что величина $\text{tg } \delta$ для СРП в алмазе должна быть по крайней мере $\leq 3 \cdot 10^{-8}$ при тех же условиях.

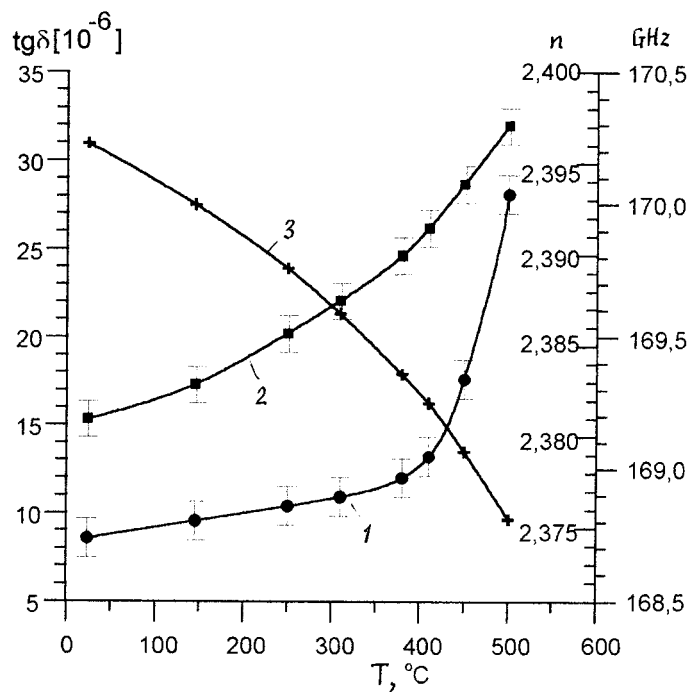
Исследована серия поликристаллических алмазных пластин, выращенных в ИОФ РАН методом плазмохимического осаждения из смесей $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-O}_2$ в СВЧ разряде [9]. Скорости роста составляли $2\text{-}5 \mu\text{m/h}$, концентрация примесного азота находилась в пределах $(2\text{-}30) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Отделенные от подложки образцы имели форму дисков $\text{Ø } 55\text{-}60 \text{ mm}$ и толщину до 1.3 mm . Измерения проводились в открытых резонаторах в ИРЭ РАН [3] и ИПФ РАН [10]. Были также измерены зависимости потерь и показателя преломления от температуры

Таблица 1. Потери $\text{tg } \delta$ на волне $\lambda = 2.15 \text{ mm}$ при комнатной температуре в алмазных пленках

№ образца	Средняя толщина, μm	Скорость роста, $\mu\text{m/h}$	$\text{tg } \delta, 10^{-4}$
92	1280	5.0	8
83	190	4.6	10
79	490	4.5	$1.5 \div 3$
70	230	3.9	< 5
111	490	3.7	$1 \div 2$
93	430	3.2	2
56	270	2.7	2
100	640	2.6	$1.5 \div 3.5$
AST	180	2.5	< 2

Таблица 2. Потери на волнах $\lambda = 2\text{-}7 \text{ mm}$ в образце № 79

$\lambda, \text{ mm}$	2.15	3.9	6.0	6.8
$\text{tg } \delta, 10^{-4}$	$1.5 \div 3$	4	5	9.5



Температурные зависимости $\text{tg } \delta$ (1), показателя преломления n (2) и резонансной частоты (3) в алмазном диске толщиной 0.74 mm.

в области $T = 20\text{--}500^\circ\text{C}$. Результаты для серии нешлифованных дисков (измерения в ИРЭ РАН) представлены в табл. 1, 2.

Величины потерь лежат в диапазоне $\text{tg } \delta = (1\text{--}10) \cdot 10^{-4}$, причем наблюдается тенденция к снижению потерь при уменьшении скорости роста и содержания примесного азота. В образце № 111 после отжига его на воздухе при температуре $T = 550^\circ\text{C}$ наблюдалось значительное снижение $\text{tg } \delta$ с $\approx 1.5 \cdot 10^{-4}$ до $\approx 5 \cdot 10^{-5}$.

Наименьшие потери наблюдались в образце № 113 (скорость осаждения $2.4 \mu\text{m/h}$, концентрация азота $2 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$) (измерения проведены в ИПФ РАН, см. рисунок). Для повышения точности измерений, в связи с малостью потерь, диск был отшлифован с обеих сторон, с отклонением от плоскопараллельности менее 0.005 mm на диаметре 55 mm. Его тол-

щина была уменьшена с 1.05 до 0.74 mm, для которой частота измерений 170 GHz становилась "резонансной" (толщина кратна половине длины волны в материале). После механической обработки диск отжигался на воздухе. Методика измерений [10] была несколько модифицирована так, что ошибка данных измерений $\text{tg } \delta$ составила $\pm 10^{-6}$. Величина потерь в этом образце $\text{tg } \delta \sim 8 \cdot 10^{-6}$ (170 GHz; 20°C) находится на уровне наименьшего значения из известных в литературе для алмаза [6b] и приближается к рекордно низким потерям ($\text{tg } \delta \sim 3 \cdot 10^{-6}$), наблюдаемые в Si: Au [8].

Расчет пропускной способности показывает, что лучшие исследованные алмазы применимы для создания окон гиротронов с мощностью ≥ 3 MW в непрерывном режиме генерации.

Зависимость потерь от частоты f в данном диапазоне (табл. 2) может быть в первом приближении аппроксимирована законом $1/f$. Наблюдаемые частотно-температурные зависимости можно объяснить потерями на проводимости в неалмазных фазах с сильно неоднородным распределением локальной динамической электропроводности σ , содержащих аморфный углерод и графит. Согласно данным спектроскопии комбинационного рассеяния, относительная объемная доля их не превышает 10^{-3} . При этом более слабое (по сравнению с законом $1/f$) возрастание потерь с понижением частоты при $f \ll 10$ GHz [7] связано с убыванием количества областей, удовлетворяющих условию: $\tau_M^{-1} \ll \omega$ (где $\tau_M = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma$ и ε — локальные величины времени максвелловской электрической релаксации и диэлектрической проницаемости соответственно, ε_0 — электрическая постоянная, $\omega = 2\pi f$). Относительно слабая зависимость потерь от температуры (при $T < 400^\circ\text{C}$) может быть естественно объяснена слабой зависимостью электропроводности в неалмазных включениях. Рост потерь при $T > 400^\circ\text{C}$ может быть связан с включением процесса дипольной релаксации в неалмазной фазе.

Наблюдаемые потери отличаются по температурно-частотным зависимостям от СРП (которые должны заметно возрасть с повышением частоты и температуры [1–3]) и значительно превосходят их оцененные величины. Таким образом, собственные решеточные потери в алмазе (как и в кремнии [3,8]) остаются экспериментально невыявленными.

Из полученных данных и рассмотренных представлений, а также оценок собственных потерь следует, что имеются возможности дальнейшего значительного снижения потерь в алмазе и достижения наименьших потерь по сравнению с другими материалами в ММ и соседних диапазонах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 96-03-32798) и МНТП России "Физика микроволн" (проекты 3.3 и 3.19).

Список литературы

- [1] *Галдецкий А.В., Гарин Б.М.* // Препринт № 17 (320). М.: ИРЭ АН СССР, 1981. 31 с.
- [2] *Гарин Б.М.* // Российская науч.-техн. конф. "Диэлектрики-93". С.-Петербург, 1993. Т. 1. С. 98-99.
- [3] *Гарин Б.М., Копнин А.Н., Пархоменко М.П.* и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 21. С. 56-59; *Garin B.M., Kopnin A.N., Parkhomenko M.P.* et al. // 21st Int. Conf. on IR & MM Waves. Berlin, 1996, paper CT15.
- [4] *Heidinger R.* // Digest of 19th Int. Conf. on IR & MM Waves. Japan, 1994. P. 277-278.
- [5] *Sussmann R.S., Brandon J.R., Scarbrook G.A.* et al. // *Diam. Relat. Mater.* 1994. V. 3. P. 303.
- [6] *Parshin V.V., Khmara V.A.* et al. // 9th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. Proc. 1997. P. 143-144; *Sporl R., Schwab R., Heidinger R.* // *Ibid*, P. 167-174.
- [7] *Ibarra A., Gonzalez M., Vila R.* et al. // *Diam. Relat. Mater.* 1997. V. 6. P. 856-859.
- [8] *Heidinger R., Molla J., Parshin V.V.* // 21st Int. Conf. on IR & MM Waves. Berlin, 1996.
- [9] *Ralchenko V.G., Smolin A.A., Konov V.I.* et al. // *Diam. Relat. Mater.* 1997. V. 6. P. 417-421.
- [10] *Dryagin Yu.A., Parshin V.V.* // *Int. J. on IR & MM Waves.* 1992. V. 13. P. 1023-1032.