

07

Диэлектрические потери в MPCVD-алмазах в полосах частот 25–30 и 250–350 GHz в зависимости от параметров процесса роста

© Б.М. Гарин¹, В.В. Паршин², Е.А. Серов², А.С. Николенко²,
Я.Ц. Лю³, М.Х. Дин³, В.Чж. Тан³

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская обл., Россия

² Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

³ Университет науки и технологии Пекина,
Пекин, Китай
E-mail: bormigar@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2018 г.

Проведено комплексное систематическое исследование влияния различных параметров процесса роста CVD-алмазов в микроволновой плазме (MPCVD-алмазов), таких как температура подложки, химический состав газовой смеси и др., на диэлектрические потери в двух частотных полосах (25–30 и 250–350 GHz) более чем для десяти образцов различных серий. Выявлена корреляция между величинами потерь в этих двух полосах частот.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46850.17307

Исследование диэлектрических свойств, в том числе диэлектрических потерь, в новых малопоглощающих материалах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитных волн является важной фундаментальной и прикладной задачей. Это относится, в частности, к материалам, из которых изготавливаются выходные окна мощных вакуумных генераторов, входные/выходные окна линий передач в электронике больших мощностей, включая входные окна термоядер-

ных реакторов [1,2]. Во всех этих примерах диэлектрические свойства материалов играют ключевую роль.

Наиболее перспективными материалами в данной области являются MPCVD-алмазы, выращенные методом осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition, CVD) в микроволновой плазме (microwave plasma, MP) [2–7].

Важной задачей является исследование влияния параметров процесса роста алмазов на их диэлектрические потери для оптимизации технологии производства. До сих пор этот вопрос не был изучен достаточно комплексно и систематически. Не хватает данных, полученных на основе систематических исследований диэлектрических потерь в большом числе образцов, выращенных при разных параметрах процесса роста, и в широком диапазоне частот.

Для этой цели была произведена большая партия (более десяти) образцов MPCVD-алмазов [7]. При производстве варьировались параметры процесса выращивания, в частности температура подложки, химический состав газовой смеси, включая концентрацию метана CH_4 в потоке в реактор и концентрацию азота N_2 , а также скорость роста. Были измерены диэлектрические потери в образцах в двух резонаторах на частотах ~ 25 и 30 GHz.

В настоящей работе частотный диапазон исследования образцов расширен до частот 250 – 350 GHz.

Более десяти образцов алмазных пленок было произведено с использованием MPCVD-реактора с резонатором куполообразной формы в Университете науки и технологии Пекина (УНТП) [7]. При производстве этих образцов систематически варьировались три наиболее важных параметра процесса роста: температура подложки, химический состав газовой смеси, включая концентрацию метана CH_4 в потоке в реактор и концентрацию азота N_2 , а также скорость роста (табл. 1). Образцы алмазных пленок были разбиты на серии с условными обозначениями T , C и N , каждая из которых отвечает изменению одного из параметров (температуры подложки, концентрации метана и азота соответственно).

Геометрические параметры этих образцов (диаметр и толщина) оказались подходящими для того, чтобы можно было исследовать диэлектрические потери в образцах не только на частотах 25 и 30 GHz, но и на частотах на порядок выше (250 – 350 GHz).

Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ алмазных образцов был измерен в УНТП [7] на частотах от 25 до 30 GHz с использованием

Таблица 1. Параметры процесса роста образцов алмазных пленок и их толщина

Экспериментальная серия	Образец	Скорость потока CH_4/H_2 , sccm	Температура подложки, $^\circ\text{C}$	Концентрация N_2 , ppm	Скорость роста, $\mu\text{m/h}$	Толщина образца, μm
T (температура подложки)	$T-1$	15/300	885 ± 10		2.9	188 ± 2
	$T-2$ ($C-2, N-1$)*	15/300	975 ± 10		4.0	237 ± 2
	$T-3$	15/300	1040 ± 10		7.0	243 ± 2
C (концентрация метана в потоке в реактор)	$C-1$	9/300	975 ± 10		1.8	202 ± 2
	$C-2$ ($T-2, N-1$)*	15/300	975 ± 10		4.0	237 ± 2
	$C-3$	24/300	975 ± 10		8.4	231 ± 2
N (концентрация азота)	$N-1$ ($T-2, C-2$)*	15/300	975 ± 10	0	4.0	237 ± 2
	$N-2$	15/300	975 ± 10	0.1	4.0	207 ± 2
	$N-3$	15/300	975 ± 10	1	4.9	185 ± 2
	$N-4$	15/300	975 ± 10	10	10.2	253 ± 2
	$N-5$	15/300	975 ± 10	40	18.3	245 ± 2

* Этот образец присутствует во всех трех экспериментальных сериях.

двух металлических цилиндрических резонаторов. Соответствующая измерительная техника подробно описана в работе [8].

Диэлектрические потери образцов, представленных в табл. 1, были измерены в Институте прикладной физики РАН на частотах 250–350 GHz резонансным методом с помощью высокочастотного открытого резонатора Фабри–Перо [9]. Значения тангенса угла потерь в полосах частот 25–30 и 250–350 GHz приведены в табл. 2.

Диэлектрические потери на частотах $f < 100$ GHz обусловлены главным образом наличием электрической проводимости на границах кристаллитов [5]. Частотная зависимость таких потерь может быть описана выражением

$$\tan \delta = a/f, \quad (1)$$

где $a = \sigma/2\pi\epsilon\epsilon_0$, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 — электрическая постоянная, σ — удельная проводимость.

На частотах $f > 100$ GHz проявляются два других механизма, при которых потери возрастают с частотой. Оба эти механизма связаны с

Таблица 2. Диэлектрические потери в алмазных образцах

Образец	25 GHz-резонатор		30 GHz-резонатор		Субмиллиметровый резонатор	
	Частота, GHz	$\tan \delta$, 10^{-4}	Частота, GHz	$\tan \delta$, 10^{-4}	Частота, GHz	$\tan \delta$, 10^{-4}
T-1	24.38	1.74 ± 0.12	30.70	1.55 ± 0.12	348.01	0.47 ± 0.05
T-2 (C-2, N-1)	24.08	1.09 ± 0.08	29.75	0.96 ± 0.07	271.65	0.6 ± 0.5
T-3	24.04	8.15 ± 0.57	29.65	8.04 ± 0.56	266.16	2.9 ± 0.5
C-1	24.31	0.37 ± 0.02	30.43	0.30 ± 0.02	321.85	0.6 ± 0.05
C-3	24.11	3.40 ± 0.24	29.81	3.21 ± 0.22	275.67	1.0 ± 0.5
N-2	24.31	2.21 ± 0.15	30.32	2.32 ± 0.16	309.72	1.3 ± 0.5
N-3	24.41	2.60 ± 0.18	30.80	3.07 ± 0.21	349.5	1.8 ± 0.5
N-4	23.97	1.53 ± 0.11	29.41	1.70 ± 0.12	253.57	1.2 ± 0.5
N-5	24.03	1.00 ± 0.07	29.60	1.14 ± 0.08	264.03	1.1 ± 0.5

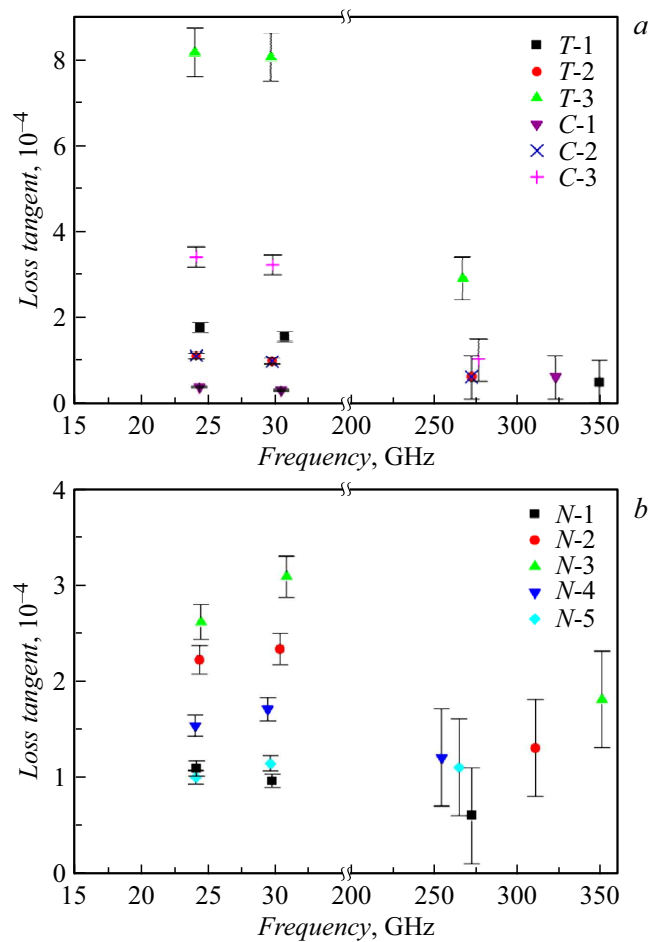
нарушениями упорядоченности в кристаллической решетке, включая различные дефекты кристаллической решетки, в частности границы между кристаллитами в поликристаллах, таких как MPCVD-алмазы, а также различные микрокаверны, точечные дефекты, примесные атомы и т.д. [10,11].

Первый механизм — однофононные диэлектрические потери, связанные с возбуждением акустических фононов, индуцированные неупорядоченностями кристаллической решетки [10]. Для этого механизма $\tan \delta \sim f$.

На частотах $f > 300$ GHz в MPCVD-алмазах потери могут быть обусловлены также рэлеевским рассеянием на дефектах и микрокавернах [11]. Они резко возрастают с частотой.

Наблюдается корреляция между величинами потерь в частотных полосах 25–30 и 250–350 GHz практически для всех образцов. Она видна из рисунка, *a, b*.

Эта корреляция может быть объяснена следующим: в обеих частотных полосах основной вклад в диэлектрические потери вносят потери в областях вблизи границ кристаллитов. Это может быть связано с тем фактом, что в MPCVD-алмазах относительно большая объемная доля решеточных дефектов относится к областям, расположенным между кристаллитами (зернами).



Корреляция между величинами потерь в частотных полосах 25–30 и 250–350 GHz для различных серий образцов. *a* — серии *T* и *C*, *b* — серия *N*.

Таким образом, впервые проведено комплексное систематическое исследование диэлектрических потерь в частотных полосах 25–30 и 250–350 GHz более чем для десяти образцов MPCVD-алмазов, полученных при различных параметрах процесса роста, включая тем-

плату подложки, концентрации метана и азота в газовой среде, а также скорость роста.

Обнаружена корреляция между значениями потерь в обеих частотных полосах для всех серий образцов. Такая корреляция может объясняться следующим образом: в обеих частотных полосах основной вклад в диэлектрические потери образцов вносят области, расположенные между кристаллитами (зернами).

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 16-52-53140).

Список литературы

- [1] *Thumm M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. N 12A. P. A143–A161.
- [2] *Schreck S., Aiello G., Meier A., Strauss D., Gagliardi M., Saibene G., Scherer T.* // Fusion Eng. Design. 2016. V. 109–111. Pt B. P. 1232–1236.
- [3] *Delgado D., Vila R.* // J. Nucl. Mater. 2014. V. 452. N 1–3. P. 218–222.
- [4] *Antipov S.P., Baryshev S.V., Butler J.E., Jing C., Kanareykin A.D., Schoessow P., Conde M., Gai W., Power J.G., Stoupin S.* // Diamond Relat. Mater. 2015. V. 54. N 1. P. 15–18.
- [5] *Паршин В.В., Гарин Б.М., Мясникова С.Е., Орленков А.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII. № 12. С. 1087–1095.
- [6] *Chernov V.V., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Lobaev M.A.* // Phys. Status Solidi A. 2016. V. 213. N 10. P. 2564–2569.
- [7] *Liu Y.Q., Ding M.H., Su J.J., Ren H., Lu X.R., Tang W.Z.* // Diamond Relat. Mater. 2017. V. 73. P. 114–120.
- [8] *Janezic M.D., Kuester E.F., Jarvis J.B.* Broadband complex permittivity measurements of dielectric substrates using a split-cylinder resonator // 2004 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. IEEE, 2004. P. 1817–1820.
- [9] *Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A.* // IEEE Sensors J. 2013. V. 13. N 1. P. 18–23. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2215315
- [10] *Гарин Б.М.* // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 11. С. 3314–3321.
- [11] *Моченева О.С., Паршин В.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. L. № 12. С. 1084–1057.