

**Паршин В.В.¹, Серов Е.А.¹, Денисов Г.Г.¹, Гарин Б.М.²,
Вьюгинов В.Н.³, Клевцов В.А.³, Травин Н.К.³**

¹Институт прикладной физики РАН

²Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН

³АО «Светлана-Электронприбор»

Применение 6H-SiC карбида кремния в ММ диапазоне для окон вывода энергии средней мощности

Представлены результаты исследований коэффициента преломления и диэлектрических потерь в монокристаллическом карбиде кремния политипа 6H-SiC в диапазоне частот от 6 до 380 ГГц и в интервале температур от 300 до 850 К с использованием высокочастотной резонаторной техники. На низких частотах ($f < 10$ ГГц) тангенс угла потерь $\sim 1/f$. При $f > 50$ ГГц потери возрастают с ростом частоты. В низкотемпературном диапазоне ($T = 300 \div 550$ К) тангенс угла потерь квазилинейно возрастает с ростом температуры. При $T > 600$ К потери возрастают экспоненциально. Рассматривается механизм поглощения в широком диапазоне температур. Приводятся расчеты применения карбида кремния в качестве мощных окон вывода энергии.

Ключевые слова: ММ и Терагерцовый диапазоны, карбид кремния, мощные окна вывода энергии, резонаторная техника.

Карбид кремния (SiC) является широкозонным полупроводником, который считается одним из основных материалов, для применений в высокоомощной и высокотемпературной электронике. Карбид кремния имеет более 200 политипов, но лишь три из них, с максимальной шириной запрещённой зоны имеют реальные применения в промышленности. Таковыми являются: 3C-SiC, имеющий кубическую решётку и ширину запрещённой зоны 2.36 эВ; 6H-SiC и 4H-SiC с чередующимися слоями кубической и гексагональной структур и запрещёнными зонами шириной 3.03 эВ и 3.26 эВ, соответственно.

Огромное количество публикаций посвящено исследованиям электрических параметров различных политипов карбида кремния и его применению в высокотемпературной микроэлектронике (см., например, обзор [1]). Но, до сих пор терагерцовый диапазон (100÷3000 ГГц) всё ещё остаётся «белым пятном в исследовании диэлектрических параметров. Существует немного публикаций в этой области [2-5]. Сия ситуация во многом объясняется труднодоступностью высококачественных монокристаллических образцов, но что ещё более существенно, отсутствием в данном диапазоне реальной проблемы, для решения которой карбид кремния являлся бы ключевым материалом.

Аналогичная ситуация складывалась с CVD-алмазом, до тех пор, пока он не нашёл уникальную сферу применения совокупности своих уникальных свойств, а именно, для окон ввода-вывода энергии мегаваттного уровня мощности для международного проекта по созданию экспериментального термоядерного реактора (ITER project).

Ситуация с карбидом кремния во многом повторяется. Конечно, он не претендует на использование в окнах мегаваттного уровня. Для SiC существует уникальная область применения – окна ввода-вывода энергии уровня мощности 50÷500 кВт. Несомненно, алмаз легко справится с этой задачей, но алмаз на порядки (!) дороже.

На настоящий момент, освоено промышленное производство высококачественных монокристаллов карбида кремния. Мировым лидером производства подложек с использованием политипов 4H-SiC и 6H-SiC является компания "Cree" (Wolfspeed), Северная Каролина, США. А также подложки производятся компаниями: "Thompson", Франция; "ABB", Швеция; "Siemens", Германия; "Hitachi", Япония. В России производство высококачественных полупроводящих подложек из монокристаллов карбида кремния диаметром 76.2 мм, политипа 6H-SiC освоено АО «Светлана-Электронприбор», Санкт-Петербург. В настоящее время, технология оптимизирована для синтеза некомпенсированных монокристаллов с большим удельным сопротивлением, а также, в направлении обработки поверхности готовой к эпитаксии качества "epi-ready" [6,7]. В нашей работе представлены результаты первого исследования диэлектрических свойств образцов 6H-SiC, производства АО «Светлана-Электронприбор», в ММ и терагерцовом диапазонах, в температурном интервале от комнатной температуры до 500°C. Так же, как и в предыдущих исследованиях CVD алмаза [8,9], представленные результаты являются основой для расчетов температурного режима окон ввода-вывода энергии уровня 50÷500 кВт.

Были исследованы образцы 6H-SiC с ориентацией подложки on-axis $\{0001\} \pm 0.2^\circ$. На Рис.1÷4 представлены результаты измерений тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$) в широком диапазоне частот 6÷380 ГГц, и в температурном интервале 300÷850 К.

На Рис.1. представлена частотная зависимость $\tan\delta$ при комнатной температуре. Измерения на частоте 6.4 ГГц выполнены с помощью цилиндрического резонатора в АО «Светлана-Электронприбор» [10]. Измерения на частоте 69 ГГц с помощью открытого полусимметричного резонатора в Институте радиотехники и электроники им. Котельникова РАН [11]. Измерения на частотах 125 ГГц, 250 ГГц и 375 ГГц выполнены с помощью высокочастотного резонатора Фабри-Перо в Институте прикладной физики РАН [12]. Необходимо отметить, что измеренные значения величины $\tan\delta$ для пяти исследованных образцов находятся в 10% интервале. На Рис.1. представлены усреднённые значения для частотной зависимости $\tan\delta$. Сплошной линией обозначена аппроксимация функцией: $\tan\delta = (0.41 + 0.0057 \cdot f + 8.13 / f) \cdot 10^{-4}$, где частота f выражена в ГГц. Аппроксимация выполнена при допущении, что на низких частотах $\tan\delta \sim 1/f$.

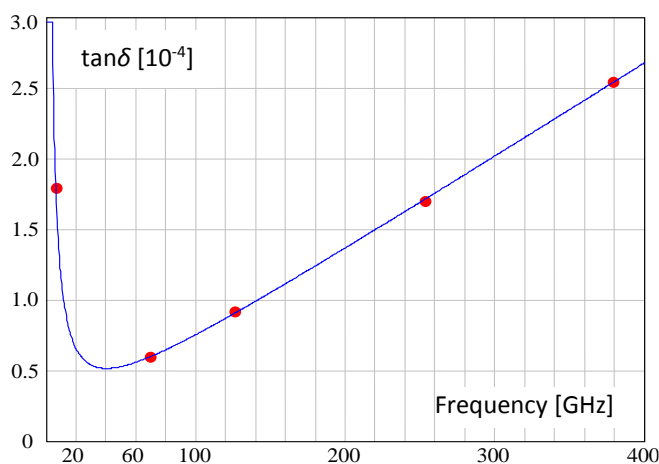


Рис. 1. Частотная зависимость $\tan\delta$ при комнатной температуре. Точки: экспериментальные данные, сплошная линия: аппроксимация.

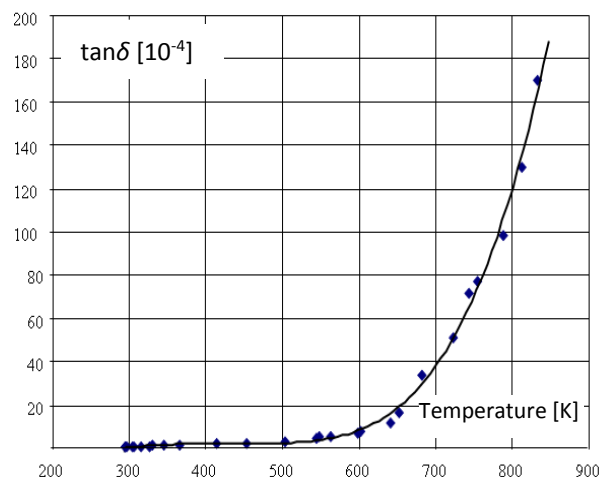


Рис. 2. Широкотемпературная зависимость $\tan\delta$ (три серии измерений) на частоте 125 ГГц.

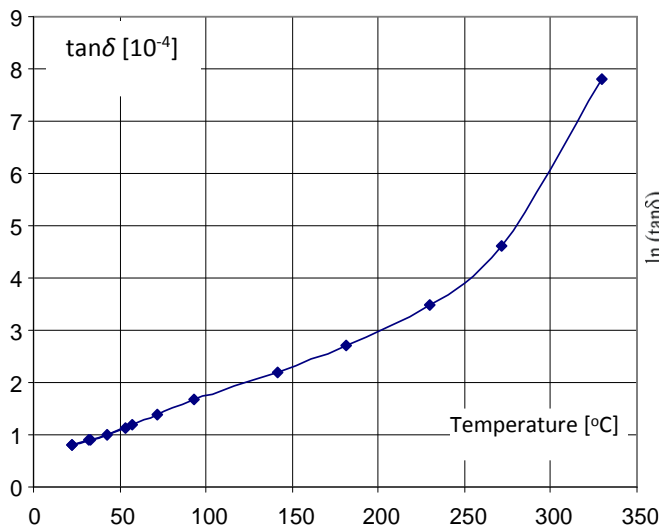


Рис. 3. Температурная зависимость $\tan \delta$ в реальном эксплуатационном диапазоне температур.

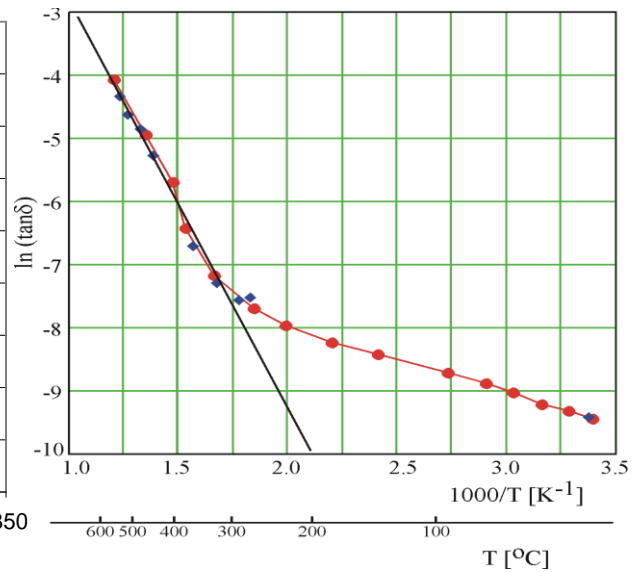


Рис. 4. Температурная зависимость $\tan \delta$ в Аррениусовых координатах, на частоте 125 ГГц (две серии измерений).

Результаты измерения в широком температурном диапазоне представлены на Рис. 2. Были выполнены три серии измерений на одном и том же образце. При температурах выше 850 К измерения невозможны вследствие сильного возрастания потерь.

На Рис.3. представлена та же зависимость величины $\tan \delta$ в реальном температурном диапазоне эксплуатации 6H-SiC. Частотная зависимость $\tan \delta$ (Рис. 1.) объясняется двумя механизмами потерь. На низких частотах $\tan \delta \sim 1/f$. Такая зависимость определяется потерями, обусловленными поглощением на свободных носителях заряда.

На частотах >50 ГГц потери возрастают с ростом частоты. Это может быть связано с внутренними решеточными потерям вследствие так называемых «разностных» двухфононных процессов поглощения при относительно высоких температурах $T > T_D/2$, где T_D – температура Дебая кристаллической решётки [4,5]. В этом процессе возбуждение оптического фонона сопровождается поглощением акустического фонона. Их частоты должны удовлетворять уравнению: $f_1 - f_2 = f$, где f_1 и f_2 – частоты оптических и акустических фононов, соответственно, f – частота электромагнитной волны. Этот механизм потерь определяет теоретический нижний предел потерь в кристалле.

Температурная зависимость тангенса угла потерь на частоте ~ 125 ГГц (Рис. 2.), выполненная в Аррениусовых координатах представлена на Рис. 4. Она позволяет определить энергию активации 1.09 ± 0.07 эВ глубокого уровня в запрещённой зоне. Аналогичные измерения на частоте ~ 250 ГГц дают близкую энергию активации, равную 0.91 ± 0.12 эВ. Возможно, эти величины могут относиться к глубокому уровню, который возникает из-за дефектов решётки [14]. Как утверждается в работе [14]: «Этот дефект является глубоким уровнем с энергией приблизительно на 1.1 эВ ниже дна зоны проводимости».

На основе измеренных частотной и температурной зависимостей диэлектрических параметров был рассчитан тепловой режим окна. Предполагается, что будет использован стандартный дизайн окна [15] с водяным охлаждением по периметру диска. Для этого случая, граничные условия (закон охлаждения Ньютона) по периметру, следующие: $\lambda(dT/dr) = -\alpha(T-T_0)$, где r – радиальная координата; λ – теплопроводность = 490 Вт/(м·К) [16]; T_0 – температура охлаждающей среды = 30°C; α – коэффициент теплоотвода с

периметра окна = 4 Вт/(см²·К). Тепловыми потоками на границах окно-вакуум и окно-воздух пренебрегаем.

Расчёты проведены в предположении, что уровень мощности гауссового пучка на периметре окна равен 10⁻⁴ от полной мощности.

На рис. 5. представлен расчёт критической мощности ($P_{кр}$) проходящего через окно гауссового пучка в зависимости от частоты при условии, что стационарный режим ещё возможен, т.е. что температура в центре окна ещё стабилизируется. Превышение критической мощности приводит к неконтролируемому росту температуры.

Толщина окна соответствует резонансному условию, т.е. его оптическая толщина кратна целому числу полуволн. Коэффициент преломления 6H-SiC равен 3.12 при T=30°C. Число полуволн выбирается из условия прочности окна. Для дисков диаметром ~70 мм толщины варьируются от 2.5 мм до 2.7 мм, для дисков диаметром ~30 мм (при f ~ 30 ГГц) от 1.5 мм до 1.8 мм. В расчётах использовалась величина коэффициента теплового расширения карбида кремния, равная 4.5·10⁻⁶/К [16], величина теплоёмкости на единицу объёма равная 2.1·10⁶ Дж/(м³·К) [16].

При работе на уровне критической мощности стационарная температура в центре окна ~265°C, температура на краю ~75°C. При работе с 50% от критической мощности температура в центре окна ~80°C, температура на краю ~40°C.

На рис. 6. представлена частотная зависимость коэффициента отражения от окна настроенного на частоту 28 ГГц. Полоса частот по уровню коэффициента отражения ~1% составляет ~1.3 ГГц. Эта полоса соответствует изменению толщины окна на ±20 мкм. Сдвигом резонансной частоты (~150 МГц) при 200°C из-за теплового расширения и, главным образом, из-за увеличения коэффициента преломления, можно пренебречь.

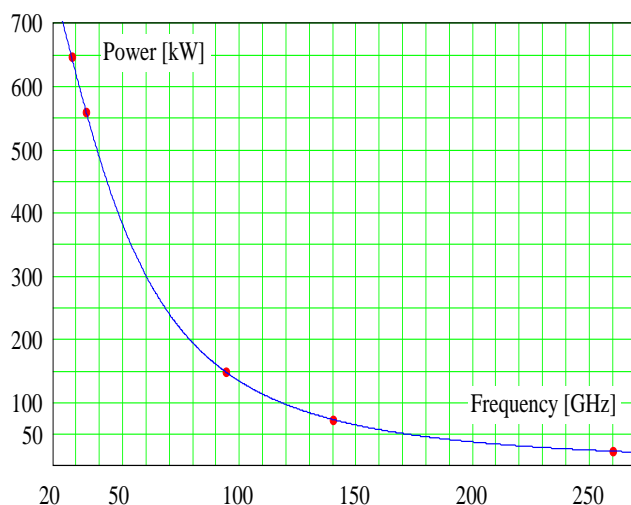


Рис. 5. Зависимость критической мощности от частоты,

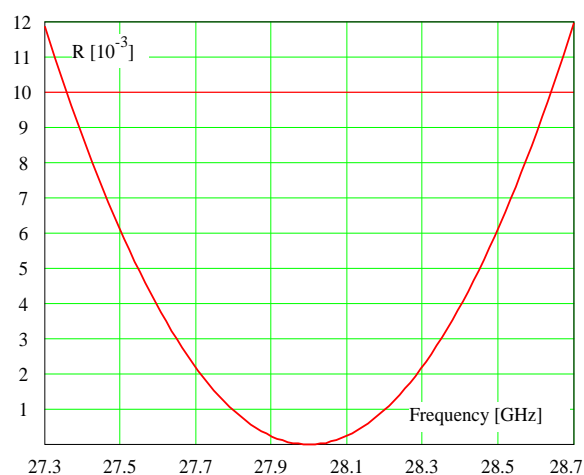


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от окна около 28 ГГц.

В заключение следует отметить, что производство высококачественного карбида кремния только началось. С развитием технологии производства высококачественных некомпенсированных кристаллов 6H-SiC, следует ожидать снижения решёточных потерь и, соответственно, возрастания критической мощности окна. Использование политипа 3C-SiC с более упорядоченной кубической решёткой и, соответственно, с ожидаемыми меньшими решёточными потерями, позволит увеличить выходную мощность окон на основе карбида кремния.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-52-53140

Библиографический список

1. Gang Liu, Blair R. Tuttle, and Sarit Dhar. "Silicon carbide: A unique platform for metal-oxide-semiconductor physics" *Applied Physics Review*. 2, 021307-1-021307-21 (2015).
2. Yu G., Dutta J.M., and Jones C.R, Potentials of SiC as a gyrotron window material, *Conf. Digest 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics*, Karlsruhe, Germany, 299-300, 2004.
3. C.R. Jones, Yuanci Gao, Temperature studies of dielectric loss in Silicon Carbide, 35th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010, pp. 1-1, DOI: 10.1109/ICIMW.2010.5613071. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5613071&tag=1>
4. B. M. Garin, Low loss limits in materials at the near millimeter range, 4th Int. Conf. on Millimeter Wave and Far Infrared Science and Technology, 1996. Proc., 1996, pp. 311–314, DOI: 10.1109/ICMWF.1996.574886. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=574886>.
5. B.M. Garin, "Lower Loss Limits at Millimeter and Terahertz Ranges", *Digest of the Joint 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics*, Karlsruhe, Germany, Sept. 27 – Oct.1, 2004/ M. Thumm, W. Wiesbeck, ed./ 0-7803-8490-3/04/\$20.00 ©2004 IEEE, pp. 393–394. DOI: 10.1109/ICIMW.2004.1422127.
6. В.Н. Вьюгинов, Н.К. Травин, О.В. Венедиктов, М.М. Коровкина, А.Ф. Цацуньников, В.В. Лундин. Развитие базовой технологии производства подложек полуизолирующего карбида кремния // Сборник статей Четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, ISBN 978-5-7629-1634-9.
7. Вьюгинов В.Н., Волков В.В., Ребров А.Н., Травин Н.К., Венедиктов О.В., Коровкина М.М., Григорьев А.Д., Козырева О.А., Паршин В.В., Серов Е.А., Гарин Б.М. "Перспективы применения отечественных подложек полуизолирующего SiC в СВЧ-диапазоне от 6 до 450 ГГц". Труды II российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева. 17-19 ноября 2015. / Под ред. А.Э. Рассадина., Н.Новгород. Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2015. С. 30-35. ISBN 978-5-9905092-3-8
8. E.V.Koposova, S.E.Myasnikova, V.V.Parshin and S.N.Vlasov. "The absorption investigation in CVD-diamond disks and windows at 50÷200 GHz. "Diamond and related materials. V. 11/8, pp 1485–1490, 2002.
9. В.В. Паршин, Б.М. Гарин, С.Е. Мясникова, А.В. Орленков. Диэлектрические потери в CVD-алмазах в ММ-м диапазоне при температурах 300–900 К. Изв. ВУЗ-ов, «Радиофизика». Том XLVII, №12, с. 1087-1095, 2004.
10. Вьюгинов В. Н., Уланова Т. А., Григорьев А. Д. Измерение параметров карбид-кремниевых подложек на СВЧ // Изв. ВУЗ-ов России. Радиоэлектроника. 2013. №3. С. 80.
11. E. E. Chigryai, B. M. Garin, R. N. Denisyuk, D. S. Kalenov, I. P. Nikitin. Ultralow absorption in Silicon Carbide in the MM-Wave range. *J. of Radio Electronics*. ISSN 1684-1719, N. 11, pp. 1-11, 2016.
12. V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov, M.A. Koshelev, E.A. Serov. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. *IEEE Sensors Journal*. V. 13, N. 1, pp. 18-23, 2013. DOI 10.1109/JSEN.2012.2215315.
13. A.A. Lebedev. Review: Deep level centers in silicon carbide. *Semiconductors*. Vol. 33, N. 2, pp. 107–130, February 1999.
14. N. T. Son, E. Sorman, W. M. Chen, O. Kordina, B. Monemar, and E. Janzen. "Possible lifetime-limiting defect in 6H SiC." *Applied Physics Letter*. 65 (21), 21 November, pp. 2687-2689, 1994.
15. G.G. Denisov, A.G. Litvak, V.E. Myasnikov, E.M. Tai and V.E. Zapevalov. "Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion." *Nuclear Fusion*, V 48, pp. 415-419, 2008.
16. Goldberg Yu., Levinshtein M.E., Rummyantsev S.L. in *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, SiC, BN, SiC, SiGe*. Eds. Levinshtein M.E., Rummyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, 93-148.