

Твердотельная электроника

УДК 666.655; 621.315.312

А.В. Борисова, А.В. Мачулянский, канд. техн. наук, Д.Д. Татарчук, канд. техн. наук,
Ю.И. Якименко, д-р техн. наук, Т.Л. Волхова, канд. техн. наук

СВЧ свойства монокристаллических материалов со структурой силленита

Исследованы монокристаллы $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ в диапазоне частот от 10^4 до 10^{12} Гц при температурах до 500 К. Определен характер дисперсии диэлектрической проницаемости в исследованном диапазоне частот. Приведены результаты экспериментальных исследований.

$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ monocrystals are explored in the range of frequencies from 10^4 to 10^{12} Hz for temperatures to 500 K. Behavior of dispersion of dielectric permittivity is certain in the investigated range of frequencies. The results of experimental researches are shown.

Ключевые слова: материалы СВЧ, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, температурный коэффициент диэлектрических потерь.

Введение

Надежность и эффективность функционирования телекоммуникационных сетей в значительной мере зависит от качества средств связи. Это, в свою очередь, приводит к необходимости разработки нового более эффективного, дешевого и миниатюрного оборудования, важными элементами которого являются различные резонансные устройства СВЧ. Поэтому совершенствование резонансных устройств является важной задачей электроники.

Одним из перспективных путей решения данной задачи является поиск новых материалов, а также нетрадиционное использование известных материалов, что невозможно без комплексного изучения свойств различных материалов.

Широкое применение в устройствах акусто- и оптоэлектроники находят кристаллы со структурой силленита, что обусловлено их пьезоэлектрическими, электрооптическими и фотоэлектрическими свойствами. Однако экспериментальные исследования силленитов направлены, преимущественно, на изучение их пьезоэлектрических свойств. Гораздо меньше внимания уделяется изучению диэлектрических характеристик силленитов в СВЧ диапазоне, что

указывает на необходимость более тщательного исследования свойств этих материалов.

С другой стороны, представляет интерес создание электрически-управляемых элементов из пьезоэлектрических кристаллов, имеющих низкое СВЧ поглощение.

Цель данной работы – комплексное изучение температурных и частотных свойств материалов со структурой силленита.

1. Особенности силленитов

Необходимо отметить, что приводимые в работах [1], [2], [3] значения диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}(\delta)$) для частот, расположенных в области пьезорезонансов имеют значительный разброс, как на низких частотах, так и в СВЧ диапазоне.

Значительный разброс, по-видимому, является следствием дефектности и отклонений стехиометрии в этих кристаллах, поскольку такие отклонения состава типичны для силленитов.

В таких случаях можно ожидать появление релаксационной поляризации в дефектных кристаллах. Однако характерные максимумы $\text{tg}(\delta)$ на низких частотах в области 300-500К не наблюдаются. Из этого следует, что поскольку вклад релаксационной поляризации незначительный и дисперсия диэлектрической проницаемости в силленитах не наблюдается, то можно предположить малые диэлектрические потери и на сверхвысоких частотах. Это, в свою очередь, позволяет рассчитывать на то, что возможно создание электрически управляемых элементов имеющих низкое СВЧ поглощение на основе силленитов.

2. Метод измерения

В работе исследованы частотные и температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.

Сверхвысокочастотные диэлектрические характеристики силленитов исследовались методом диэлектрического резонатора [4] на образцах цилиндрической формы с основным

$TE_{01\delta}$ типом колебаний. Исследования проводились в диапазоне частот 4-40 ГГц и интервале температур 80-500К. Погрешность измерения этим методом составляет для диэлектрической проницаемости менее 1.5%, а для тангенса угла диэлектрических потерь менее 7.5%.

Измерения на частотах $5 \cdot 10^4$ Гц и 10^8 Гц проводились при помощи измерителей добротности VM-560 и E4-11. Погрешность измерения ϵ не превышает 2%, а $\text{tg}(\delta)$ – 7%.

Измерения на частотах от $1.5 \cdot 10^{11}$ Гц до 10^{12} Гц проводились методами ИК спектроскопии. Погрешность измерения не превышает 3%.

3. Результаты исследований

На рисунке (1) представлены экспериментальные частотные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ (рис. 1 а) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta)$ (рис. 1 б) монокристаллов со структурой силленита $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (1) и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (2). В диапазоне частот от 10^4 до 10^{12} Гц наблюдается незначительная зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. При этом тангенс угла диэлектрических потерь для обоих материалов в указанном частотном диапазоне монотонно возрастает с увеличением частоты.

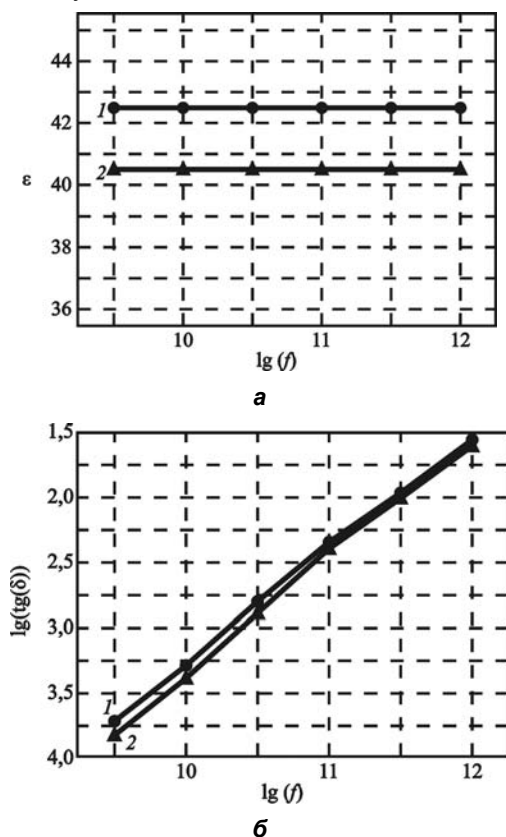


Рис. 1 Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и диэлектрических потерь (б) монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (1) и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (2)

На рисунках (2), (3), (4) приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ на частотах 4.5 ГГц, 9.6 ГГц и 20 ГГц. Из рисунка 2, а следует, что температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ близки между собой и составляют около $+40 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. У $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, температурная зависимость диэлектрической проницаемости значительно больше и составляет $+110 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. У всех исследованных монокристаллов СВЧ потери в области комнатных температур оказались низкими и незначительно различаются между собой, составляя $\text{tg}(\delta) \approx (4 \div 8) \cdot 10^{-4}$ (рис. 2, б). Вблизи 100 К в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ обнаружен максимум СВЧ поглощения, величина и температурное положение которого несколько меняется в образцах различного происхождения (рис. 3, б). В $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ниже 200 К наблюдается монотонный рост СВЧ потерь с уменьшением температуры вплоть до 77 К (рис. 3, а). В этом кристалле максимум поглощения, вероятно, тоже существует и расположен ниже 77 К.

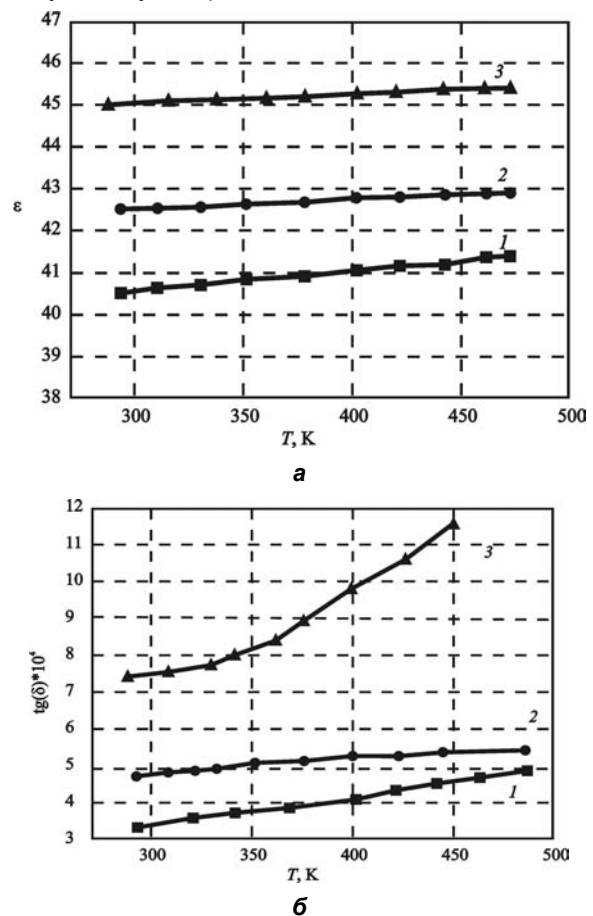
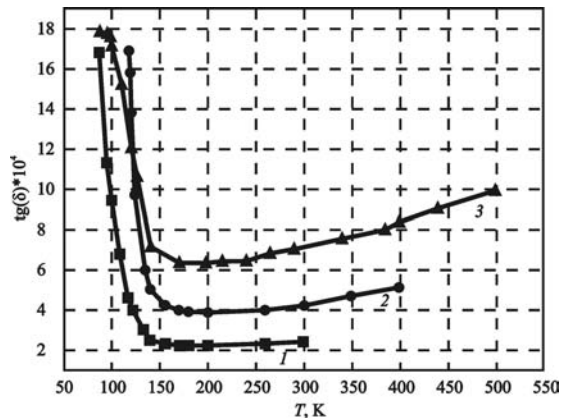
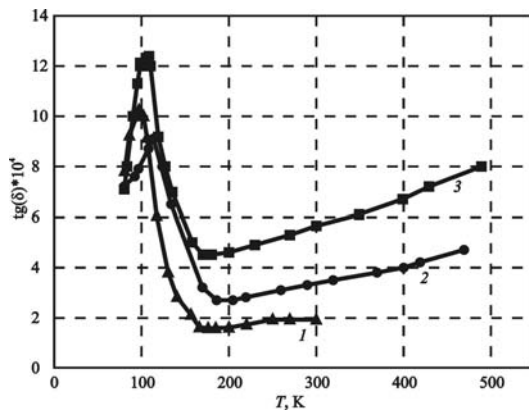


Рис. 2 Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и диэлектрических потерь (б) монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (1), $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (2) и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (3) на частоте 9.6 ГГц

Существенно отличается температурное поведение $\text{tg}(\delta)$ в кристалле титаносилленита $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (рис. 4).



а



б

Рис. 3 Температурные зависимости диэлектрических потерь монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (а) и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (б) на частотах 4.5 ГГц (1), 9.6 ГГц (2), 20 ГГц (3)

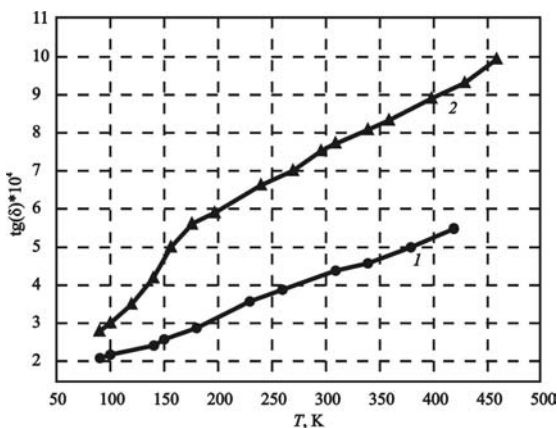


Рис. 4 Температурные зависимости диэлектрических потерь монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ на частотах 9.6 ГГц (1) и 20 ГГц (2)

В этом кристалле СВЧ поглощение вблизи 100 К начинает резко снижаться и при 77 К достигает значения ($\text{tg}(\delta) \approx 1.3 \cdot 10^{-4}$). Вполне вероятно, что природа аномального поведения СВЧ поглощения в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ одинакова.

Выводы

- Для монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ показано отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости во всем исследованном диапазоне частот и температур.
- Экспериментально установлено, что монокристаллы $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ имеют положительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости во всем исследованном интервале температур.
- Монокристаллы $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ имеют малые СВЧ потери в диапазоне температур (200-400) К.

Таким образом, все вышеуказанное в сочетании со сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (около 40) делает эти материалы привлекательными для их использования в СВЧ устройствах.

Литература

1. *Kuwata J., Onoda M., Uchino K., Momyra S.* Dielectric losses in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystals. // J. Jap. Appl. Phys. 1981. V.20. No.8. pp.1609-1610.
2. *Aldrich R.S., Hou S.L., Harvi M.L.* Dielectric and Optical Properties of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. // J. Appl. Phys. 1971. V.42. pp.493.
3. *Link J., Fontanella J.* Temperature Variation of the Dielectric Properties of Bismuth Germanate and Bismuth Germanium Oxides. // J. Appl. Phys. 1980. V.51. No.8. pp.4352-4356.
4. *Татарчук Д.Д.* Вимірювання НВЧ-параметрів матеріалів методом діелектричного резонатора Е-типу. // «Електроника і зв'язь», 2002, №14, С.22-23.