

Твердотельная электроника

УДК 621.372.41

Ю.В. Диденко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

Частотные и температурные зависимости диэлектрических потерь в полупроводниках на СВЧ

В статье проанализирована природа диэлектрических потерь в кремнии и арсениде галлия. Приведены экспериментальные частотные и температурные зависимости диэлектрических потерь в полупроводниках на СВЧ. Также показаны результаты математического моделирования. Библ. 3, рис. 3.

Ключевые слова: полупроводниковые материалы; тангенс угла потерь; диэлектрическая проницаемость; частотная зависимость потерь; проводимость; квазиДебаевский механизм.

I. Введение

Диэлектрики используются во многих частотных диапазонах. В настоящее время для электроники и информационных технологий наиболее важным интервалом частот является гигагерцовый диапазон. Например, местная телефонная связь в настоящее время успешно осваивает частотный диапазон около 60 ГГц, автомобильные радары работают на частотах около 80 ГГц, а некоторые военные радары – около 100 ГГц. В соответствующих устройствах, таких как подложки, резонаторы, фильтры, линии передачи, используют диэлектрики с диэлектрической проницаемостью более 10 и как можно меньшим коэффициентом потерь.

Высокорезистивный кремний и высокорезистивный арсенид галлия в микроволновом диапазоне представляют собой диэлектрики с малым значением потерь, сравнимым с потерями в СВЧ диэлектриках, что позволяет их использовать в качестве диэлектрических волноводов, резонансных СВЧ элементов, подложек и т.д. Это дает возможность создания в монолитном исполнении схем объединяющих пассивные и активные СВЧ элементы. Поэтому в данной статье рассмотрены диэлектрические параметры полупроводников на СВЧ.

II. Анализ диэлектрических потерь в кремнии и арсениде галлия

В сильнолегированном кремнии величина тангенса угла потерь зависит исключительно от проводимости и частоты:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon' \omega}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – частота электрического поля, σ – удельная проводимость, ε_0 – электрическая константа, ε – независящая от частоты диэлектрическая проницаемость. Согласно уравнению (1), тангенс угла потерь, обусловленных проводимостью, линейно уменьшается с ростом частоты (рис. 1).

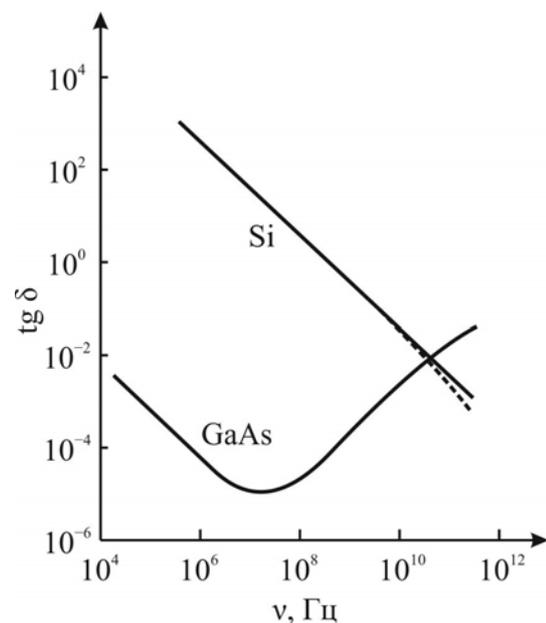


Рис. 1. Графики частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в кремнии и арсениде галлия

Такой характер зависимости справедлив для потерь в кремнии при температурах 400 К и выше, когда электронная проводимость не зависит от частоты (рис. 2). При температуре 300 К в терагерцовом диапазоне длин волн наблюдается дисперсия проводимости из-за снижения подвижности электронов, что приводит к отклонению частотной зависимости тангенса угла потерь от линейного вида (рис. 1, пунктирная линия).

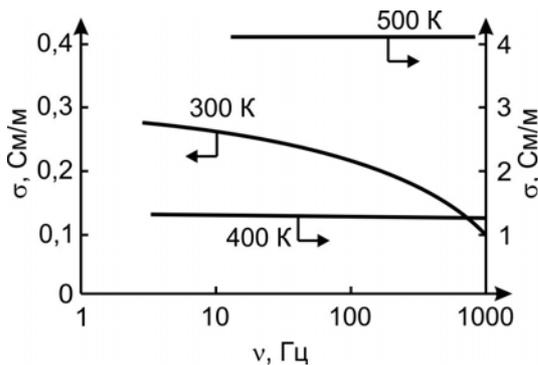


Рис. 2. Графики частотной зависимости проводимости кремния при различных температурах [1]

Частотная зависимость тангенса угла потерь в арсениде галлия, также как и в кремнии, на радиочастотах имеет линейно спадающий вид (см. рис. 1), поскольку определяется тем же механизмом. Однако в СВЧ диапазоне в данном материале влияние проводимости на потери снижается и начинают преобладать быстрые механизмы релаксационной поляризации (квазидебаевский механизм), в условиях, когда $\omega\tau < 1$:

$$\operatorname{tg}\delta \approx \frac{\omega}{2\nu_D} \exp \frac{U}{kT} \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{\varepsilon(0)}, \quad (2)$$

где ν_D – частота Дебая, k – постоянная Больцмана, U – потенциальный барьер, τ – время релаксации, $\varepsilon(0)$ – диэлектрическая проницаемость на частоте значительно ниже частоты релаксации ($\omega\tau \ll 1$), $\varepsilon(\infty)$ – диэлектрическая проницаемость на частоте значительно выше частоты релаксации ($\omega\tau \gg 1$). В этом случае, как видно из выражения (2), потери в арсениде галлия увеличиваются с ростом частоты, что на физическом уровне является проявлением внутреннего полярного механизма поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Из-за пьезоэлектрического эффекта, в GaAs возникает процесс релаксации, обусловленный взаимодействием акустических

и оптических фононных мод [2]. Эта электромеханическая связь является результатом "утечки" электрической энергии из возбужденных электрическим полем оптических фононов в "тепловой резервуар" акустических фононов.

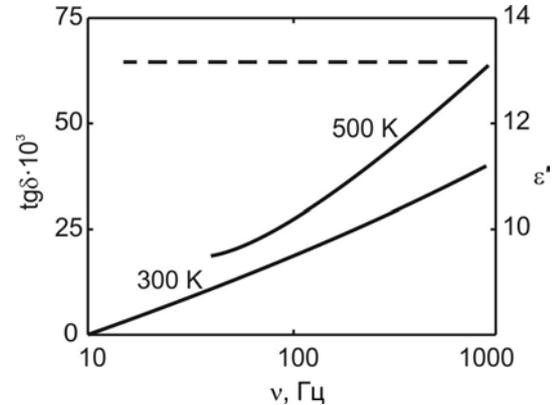


Рис. 3. Вклад квазидебаевского механизма в потери в полярном кристалле GaAs (пунктирная линия – диэлектрическая проницаемость) [3]

С повышением температуры, и, следовательно, с увеличением амплитуды колебаний атомов, проявление ангармонизма становится более заметным, а потери увеличиваются (рис. 3). Следовательно, при разработке или применении СВЧ диэлектриков необходимо избегать наличия любых полярных (нецентросимметричных) компонент в составе диэлектрической композиции.

Выводы

1. В кремнии при температуре 300 К в терагерцовом диапазоне длин волн наблюдается отклонение частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от линейного вида. Что вызвано дисперсией проводимости в указанном диапазоне частот, вследствие снижения подвижности электронов.
2. В арсениде галлия частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ на радиочастотах линейна, поскольку основной причиной потерь являются потери на проводимость.
3. В СВЧ диапазоне преобладающим механизмом потерь в арсениде галлия становится релаксационная поляризация, описываемая квазидебаевским механизмом, что приводит к резкому возрастанию потерь с частотой.
4. С повышением температуры в полярных кристаллах арсенида галлия резко увеличи-

ваються потери, что необходимо учитывать при разработке СВЧ устройств на основе упомянутого материала.

3. *Didenko Y.V. Temperature Dependences of Losses in High Frequency Dielectrics / Y.V. Didenko, Y.M. Poplavko, D.D. Tatarchuk // Electronics and Communications. – 2014. – Vol. 19. – №4(81). – PP. 28–35.*

Список литературных источников

1. *Поплавко Ю.М. Мікрохвильова діелектрична спектроскопія [Текст]: навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, В.І. Молчанов, В.А. Казміренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 304 с.*
2. *Поплавко Ю.М. П'єзоелектрики: навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, Ю.І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 328 с.*

Поступила в редакцію 27 лютого 2015 г

УДК 621.372.41

Ю.В. Діденко

Кафедра мікроелектроніки, НТУУ "Київський політехнічний інститут",
вул. Політехнічна, 16, м. Київ, 03056, Україна.

Частотні та температурні залежності діелектричних втрат у напівпровідниках на НВЧ

У статті проаналізована природа діелектричних втрат у кремнії та арсеніді галію. Наведено експериментальні частотні й температурні залежності діелектричних втрат у напівпровідниках на НВЧ. Також показані результати математичного моделювання. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: напівпровідникові матеріали; тангенс кута втрат; діелектрична проникність; частотна залежність втрат; провідність; квазідебаєвський механізм.

UDC 621.372.41

Y. Didenko

Microelectronics Department of NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»,
st. Polytechnique, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

Frequency and temperature dependences of the dielectric loss in semiconductors at UHF

The article analyzes the nature of the dielectric loss in silicon and gallium arsenide. The experimental frequency and temperature dependences of the dielectric loss in semiconductors at UHF are presented. Also the results of mathematical modeling are shown. References 3, figures 3.

Keywords: semiconductor materials; the loss tangent; the dielectric permittivity; the frequency dependence of losses; the conductivity; the quasi-Debye mechanism.

References

1. *Poplavko, Y. M., Molchanov, V. I., Kazmirenko, V. A. (2011). Microwave Dielectric Spectroscopy. Kiev, NTUU «KPI». P. 304. (Ukr)*
2. *Poplavko, Y. M., Yakimenko, Y. I. (2013). Piezoelectrics. Kiev, NTUU «KPI». P. 328. (Ukr)*
3. *Didenko, Y. V., Poplavko, Y. M., Tatarchuk, D. D. (2014). Temperature Dependences of Losses in High Frequency Dielectrics. Electronics and Communications. Vol. 19, no. 4(81), pp. 28–35.*