

Таблица 9.1

Вещество	Химическая формула	Температура Кюри, T_k, K
Ниобат лития	$LiNbO_3$	1500
Ниобат калия	$KNbO_3$	685
Титанат бария	$BaTiO_3$	400
КДР	KH_2PO_4	123
Сегнетова соль	$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	297
		255

электриков вводится понятие *дифференциальной относительной диэлектрической проницаемости*:

$$\epsilon_{\text{диф}} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial D}{\partial E}. \quad (9.70)$$

Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков сильно зависит от температуры. С повышением температуры P уменьшается и при некоторой температуре T_k , называемой *сегнетоэлектрической точкой Кюри*, P обращается в нуль. Таким образом, при $T > T_k$ тепловое движение разрушает сегнетоэлектрическое состояние и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. В параэлектрической области зависимость ϵ от температуры описывается законом Кюри—Вейсса:

$$\epsilon = \frac{C}{T - T_k}. \quad (9.71)$$

Значения температуры Кюри для различных сегнетоэлектриков приведены в таблице 9.1. Из таблицы видно, что сегнетоэлектрический эффект в сегнетовой соли существует в очень узкой области температур.

Ряд ионных кристаллов, обладая спонтанной поляризацией, не обладает в то же время постоянным электрическим моментом. Такие кристаллы можно рассматривать как совокупность двух, вставленных одна в другую подрешеток, поляризованных в противоположных направлениях. Они получили название *антисегнетоэлектриков*. При некоторой температуре, называемой *антисегнетоэлектрической температурой Кюри*, они превращаются в параэлектрики.

Так же как пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики находят широкое применение в разнообразных устройствах электронной техники.

9.13. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Потерями называют ту часть электрической энергии, которая превращается в диэлектрике в тепло. Поскольку диэлектрики обладают некоторой проводимостью (хотя и очень незначитель-

ной), в них выделяется джоулево тепло даже в постоянном электрическом поле. Однако под действием переменного поля диэлектрики обычно нагреваются значительно сильнее, чем под действием такого же постоянного поля. Особенно значительный нагрев наблюдается в полях высокой частоты. Выделяемое в диэлектрике тепло обусловлено не только действием сквозного тока, но и процессами установления поляризации в переменном электрическом поле. Часть потерь, обусловленная сквозным током, называется *омическими потерями*. Потери, связанные со смещением связанных зарядов, получили название *диэлектрических потерь*.

Одно из первых экспериментальных исследований диэлектрических потерь было выполнено в 1886 году в России профессором И. И. Боргманом, который показал, что нагрев стекла зависит не только от частоты, но также и от разности потенциалов на обкладках конденсатора.

Диэлектрические потери очень сильно зависят от концентрации дефектов или примесных атомов. Таким образом, изучение диэлектрических потерь может дать важную информацию о дефектах и примесном составе. С другой стороны, изменяя плотность дефектов или примесей в кристалле, можно получать диэлектрики с широким интервалом изменения диэлектрических потерь. При этом особое значение приобретает вопрос об уменьшении диэлектрических потерь. Диэлектрики, например, широко используются в микроэлектронике. Плотность элементов в интегральных схемах может достигать 10^6 — 10^7 см⁻². Ясно, что вопрос об уменьшении выделения тепла здесь исключительно важен.

В переменном поле $E + E_0 e^{i\omega t}$ через диэлектрик потечет ток, плотность которого представляет собой сумму плотности сквозного тока $j_{скв}$ и плотность тока смещения $j_{см}$:

$$j = j_{скв} + j_{см}.$$

При этом

$$j_{скв} = \sigma E; \quad j_{см} = \frac{dD}{dt} = \frac{d(\epsilon_0 \epsilon E)}{dt}. \quad (9.72)$$

В переменных электрических полях диэлектрическая проницаемость ϵ представляет собой комплексную функцию частоты

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega). \quad (9.73)$$

Физический смысл комплексной диэлектрической проницаемости заключается в том, что вектор смещения $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$ имеет две составляющие: $\epsilon' \vec{E}$ — фазе с \vec{E} и $\epsilon'' \vec{E}$, которая отстает по фазе от \vec{E} на угол $\frac{\pi}{2}$.

Поскольку

$$\frac{dD}{dt} = \epsilon_0 \epsilon^* i \omega E, \quad (9.74)$$

$$j = \sigma E + E_0 i \omega (\epsilon' - i \epsilon'') E = (\sigma + \epsilon_0 \epsilon'' \omega) E + i \epsilon_0 \epsilon' \omega E.$$

Таким образом, полная плотность тока имеет активную составляющую $j_a = \sigma E + \omega \epsilon_0 \epsilon'' E$ и реактивную составляющую $j_r = \omega \epsilon_0 \epsilon' E$, $j = j_a + i j_r$.

На практике, как правило, определяют не сами потери, а тангенс угла диэлектрических потерь. Эту величину вводят следующим образом. Построим векторную диаграмму токов для конденсатора, заполненного диэлектриком с потерями. Как известно, потери в электротехнике обычно описываются углом между векторами напряжения и тока (рис. 9.15). Поскольку угол φ мало отличается от $\frac{\pi}{2}$, эта величина не очень удобна.

Потери в диэлектриках принято характеризовать углом δ , дополняющим φ до $\frac{\pi}{2}$. Из рис. 9.15 видно, что отношение активной плотности тока к реактивной и есть тангенс угла δ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{j_a}{j_r}. \quad (9.75)$$

Так же как и ϵ , $\operatorname{tg} \delta$ является макроскопической характеристикой диэлектрика. Так как сквозная проводимость в диэлектриках относительно мала, ею можно пренебречь. При этом

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{j_a}{j_r} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (9.76)$$

Из теории переменного тока известно, что активная мощность (т. е. диэлектрические потери в диэлектрике)

$$W = V I \cos \varphi = V I_a = V I_r \operatorname{tg} \delta. \quad (9.77)$$

В диэлектриках с чисто электронной поляризацией (полиэтилен, полистирол, фторопласт и др.) диэлектрические потери очень малы ($\operatorname{tg} \delta \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$). В этом случае $\operatorname{tg} \delta$ не зависит от температуры и частоты вплоть до 10^9 Гц. В диэлектриках с релаксационной поляризацией $\operatorname{tg} \delta$ существенно изменяется с изменением T и ω . На основе анализа выражений для активного и реактивного токов, связанных с различными видами поляризации, можно получить информацию о вкладе того или иного механизма поляризации в диэлектрические потери.

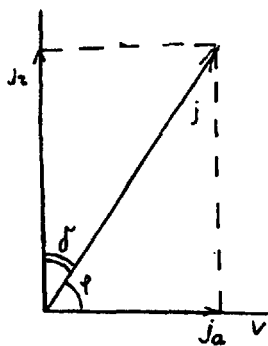


Рис. 9.15. Векторная диаграмма токов