

УДК 538.565

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ И УЛЬТРАЗВУКА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ ИЗ КТАО₃

Г. В. Белокопытов, И. В. Иванов, В. Н. Семененко, В. А. Чистяев

(кафедра физики колебаний)

В диэлектрических резонаторах из танталата калия экспериментально реализованы параметрические эффекты, обусловленные электрострикцией: преобразование ультразвукового сигнала в СВЧ-сигнал и параметрическое усиление колебаний СВЧ.

Танталат калия обладает весьма малыми диэлектрическими и акустическими потерями при гелиевых температурах [1, 2]. Благодаря этому образцы КТАО₃ являются высокодобротными диэлектрическими резонаторами (ДР) как для упругих, так и для электромагнитных СВЧ-колебаний. Вследствие электрострикции в centrosymmetric кристалле возможны трехчастотные нелинейные взаимодействия с участием двух электромагнитных и одного акустического кванта. В этих процессах происходит либо распад электромагнитного кванта:

$$\omega_n \rightarrow \omega_- + \Omega, \quad (1)$$

либо слияние с акустическим:

$$\omega_n + \Omega \rightarrow \omega_+. \quad (2)$$

Эффективность таких взаимодействий на много порядков возрастает в резонансных условиях, когда частоты ω_n , $\omega_\pm$ и Ω близки к соответствующим собственным частотам резонатора. Если при этом процессы распада (1) идут более интенсивно, чем процессы слияния квантов (2), то возбуждение в ДР электромагнитных колебаний, амплитуда которых превышает определенный порог, ведет к параметрической генерации акустических колебаний и электромагнитных комбинационных частот (разностной и суммарной).

Явление стрикционной параметрической генерации в ДР из КТАО₃ было экспериментально обнаружено и исследовано в работах [3, 4]. При гелиевых температурах в диэлектрических резонаторах сантиметрового диапазона параметрическое возбуждение наблюдалось при пороговой мощности накачки $P_{\text{пор}}$ порядка 10^{-5} — 10^{-4} Вт. В настоящей работе изучались параметрические взаимодействия в допороговом режиме, когда наряду с колебаниями накачки в ДР поступал слабый сигнал (акустический или электромагнитный).

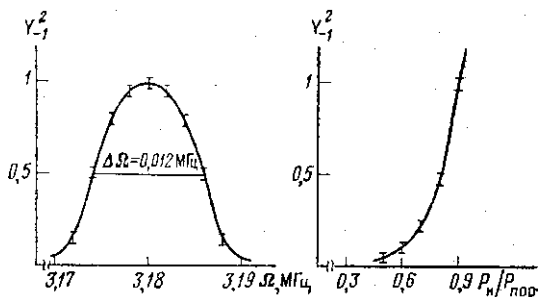
Эксперимент проводился с ДР, полученными путем выкалывания из монокристаллов КТАО₃. Исследуемый образец (объемом ~ 1 мм³) закреплялся в специальном держателе на конце тонкой керамической трубки и помещался в охлаждаемую измерительную ячейку в сосуде Дьюара. Возбуждение электромагнитных колебаний в ДР происходило в короткозамкнутой петле на конце коаксиального кабеля. Перемещая резонатор в петле, можно было легко менять уровень связи с трактом и нагруженную добротность. Мощность накачки от перестраиваемого или свин-генератора диапазона 8,2—10 ГГц поступала в измерительную ячейку через циркулятор. Отраженный сигнал направлялся в систему индикации, где имелась возможность наблюдать либо АЧХ тракта с ДР, либо спектр отраженного сигнала.

Нагруженная добротность электрических колебаний составляла $(2-5) \cdot 10^3$, поэтому ширина резонанса была сравнима с частотами акустических колебаний (Ω — в пределах 2—7 МГц). Соответственно в условиях эксперимента, так же как и в [3, 4], электрические колебания накачки ω_n и комбинационных частот ($\omega_n \pm \Omega$) возбуждались на одной и той же моде.

В серии экспериментов наблюдалась модуляция электромагнитных колебаний при подаче на ДР ультразвукового сигнала от кварцевого преобразователя. На рис. 1 представлена зависимость мощности

Рис. 1. Зависимость мощности сигнала разностной комбинационной составляющей от частоты акустического сигнала Ω

Рис. 2. Зависимость мощности разностной комбинационной частоты от мощности накачки (в относительных единицах); $P_{\text{пор}} = 7$ мВт, параметры резонатора: $\omega_0 = 8,7376$ ГГц, добротность $Q = 5,5 \cdot 10^3$, $\omega_n - \omega_0 = \Omega = 3,18$ МГц



разностной комбинационной частоты от Ω . По ширине полученной резонансной кривой можно определять акустическую добротность резонатора. Для исследовавшейся серии добротности варьировались в пределах 150—500 в зависимости от образца, типа акустических колебаний и граничных условий.

Если мощность накачки P_n приближалась к пороговой, то амплитуды комбинационных частот резко возрастали (рис. 2), кроме того, заметными становились комбинационные частоты высших порядков ($\omega_n = \omega_n + n\Omega$).

При свипировании частоты накачки в присутствии ультразвукового сигнала резонансная частотная характеристика мощности отраженного от ДР сигнала имела характерное искажение: на АЧХ появлялся дополнительный пик, когда ω_n была выше резонансной примерно на Ω . Аналогичное искажение наблюдалось и в режиме стрикционной параметрической генерации [3, 4]. Причина его — резонансное возрастание в отраженном сигнале амплитуды колебаний на суммарной комбинационной частоте.

В процессе модуляции происходит слияние акустического кванта с квантом накачки (2), так что ДР играет роль параметрического усилителя-преобразователя с повышением частоты в $\sim \omega_n/\Omega$ раз. Однако в отличие от трехчастотных систем здесь происходит также распад квантов накачки, сопровождаемый регенерацией упругих колебаний (1). О регенеративном характере взаимодействия свидетельствует повышение измеряемой величины акустической добротности при $P_n \rightarrow P_{\text{пор}}$.

Следует отметить, что в экспериментальной установке возможна также паразитная фазовая модуляция, вызванная отражением СВЧ-волны от вибрирующей поверхности кварцевого преобразователя. Для устранения этого эффекта кварцевая пластинка располагалась на расстоянии нескольких миллиметров от ДР, а между ними помещалась тонкая металлическая сетка, которая не препятствовала прохождению ультразвука через жидкий гелий, но существенно ослабляла напря-

женность поля СВЧ-волны у поверхности кварца. В результате паразитную модуляцию удавалось уменьшить до пренебрежимо малого уровня.

Были также проведены экспериментальные наблюдения другого допорогового параметрического эффекта — усиления электромагнитного сигнала, частота которого удовлетворяла условию $|\omega_n - \omega_c| \approx \Omega_a$, где ω_c — частота сигнала, Ω_a — собственная частота акустических колебаний. В случае низкочастотного сигнала ($\omega_c < \omega_n$) регенеративное усиление происходило за счет процессов распада (1), одновременно образующиеся при этом акустические кванты взаимодействовали с накачкой (2), вследствие этого в отраженном сигнале имела также суммарная спектральная компонента ($2\omega_n - \omega_c$). Ее амплитуда была несколько меньше амплитуды сигнальной компоненты. В случае высокочастотного сигнала ($\omega_c > \omega_n$) усиление происходило с меньшей эффективностью, но тоже носило регенеративный характер, поскольку сопровождалось образованием разностной комбинационной частоты ($2\omega_n - \omega_c$).

В эксперименте был достигнут коэффициент усиления сигнала до 15 дБ. Полоса такого усилителя определялась главным образом частотной избирательностью не электромагнитного, а акустического резонанса и составляла единицы килогерц. Даже для приблизительной оценки ширины полосы усилителя в случае независимых источников накачки и сигнала требуется весьма высокая частотная стабильность генераторов ($\Delta f/f \sim 10^{-8}$ за время измерений). Это требование удалось обойти, используя модуляцию СВЧ-генератора с частотой $\omega_m \approx \Omega_a$. В этом случае несущая частота играла роль накачки, а в качестве сигнала использовалась одна из боковых компонент. Для измерения полосы усиления таким способом можно было пользоваться стандартными генераторами (СВЧ и частоты модуляции) со стабильностью $\Delta f/f \sim 10^{-5}$. В процессе измерений происходило одновременное усиление двух боковых частот ($\omega_c = \omega_n \pm k\omega_m$), однако при достаточно большой величине добротности на электромагнитной моде усиление высокочастотной компоненты существенно менее эффективно и соответствующая систематическая ошибка невелика. При усилении 10 дБ рабочие полосы для исследовавшихся резонаторов лежали в пределах 2—6 кГц.

Представляет интерес дальнейшее исследование параметрических усилителей, активными элементами которых являются высокодобротные электромеханические резонаторы. Обладая всеми качествами параметрических усилителей (в том числе потенциально малыми шумами), они имеют специфические особенности, обусловленные тем, что частоты электромагнитных колебаний ДР на несколько порядков выше, чем собственные частоты упругих колебаний. Как следствие, параметрические электромеханические преобразователи на ДР из KTaO_3 оказываются узкополосными и многочастотными системами. Для анализа параметрических процессов в них следует учитывать взаимодействие по крайней мере четырех частот. Теоретическое описание четырехчастотных параметрических систем не вызывает принципиальных затруднений и может быть проведено с использованием результатов [4—6].

Усилители с весьма узкой полосой могут быть полезными в устройствах, где важна высокая частотная избирательность. Поскольку рабочую частоту усилителя можно легко перестраивать, изменяя частоту накачки, такой усилитель можно использовать для анализа спектра сигналов. Эффективные параметрические преобразователи меха-

нических колебаний в электромагнитный СВЧ-сигнал также могут быть полезными в системах регистрации малых механических смещений, дополняя существующие квазисосредоточенные датчики [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бузин И. М., Иванов И. В., Чистяев В. А. // ФТТ. 1980. 22, № 9. С. 2848. [2] Baggett H. H. // Phys. Rev. 1969. 178, N 2. P. 743. [3] Белокопытов Г. В., Иванов И. В., Решетников М. Е., Чистяев В. А. // Письма в ЖТФ. 1984. 10, № 19. С. 1210. [4] Чистяев В. А., Белокопытов Г. В. Деп. ВИНТИ № 7525-B86. М., 1986. [5] Anderson D. B. // IEEE Trans. El. Dev. 1963. ED-10, N 1. P. 13. [6] Белокопытов Г. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. 30, № 9. С. 1121. [7] Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. М., 1981.

Поступила в редакцию
12.10.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 1

УДК 621.385.833

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В РЕЖИМЕ ЛОКАЛЬНОЙ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦА

А. Р. Гареева, В. И. Петров, Г. А. Чижов

(кафедра физической электроники)

Выполнен расчет в приближении точечного источника генерации электронно-дырочных пар в полупроводнике. Показано, что пространственное разрешение зависит не только от диффузионной длины неосновных носителей, но и от скорости поверхностной рекомбинации и степени поглощения излучения в веществе.

Пространственное разрешение является одной из наиболее важных характеристик любого микроскопического прибора. В просвечивающей электронной микроскопии в настоящее время приняты два способа оценки пространственного разрешения — по точкам и по решетке [1]. Во втором случае, где объектом является кристалл и за меру разрешения принимается расстояние между отображаемыми плоскостями кристаллической решетки, исключается субъективный фактор, связанный с приготовлением тест-объекта, при этом объект представляет собой линейную структуру.

В растровой электронной микроскопии для режима вторичной электронной эмиссии широко используется первый способ оценки разрешения. Что касается режима катодолюминесценции (КЛ), то здесь вопросам тест-объектов и способам оценки пространственного разрешения практически не уделялось внимания. В этом режиме в отличие от упомянутых выше очень трудно создать тест-объект для контроля разрешения по точкам. Если вторичная электронная эмиссия происходит из весьма тонких приповерхностных слоев, КЛ-излучение возникает в гораздо большем объеме с размером по глубине до нескольких микрометров, поэтому контраст «точечных» неоднородностей будет зависеть также и от их местоположения по глубине объекта, которое неконтролируемо. Из-за этого контроль разрешения по точкам для режима КЛ непригоден и единственно возможной является оценка разрешения по линейным структурам.

Такого рода структуры, представляющие собой эпитаксиальные слои GaP, легированные на определенную глубину азотом, использо-