

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

УДК 537.226/227; 621.317.78

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ КВАРЦА

В. Ф. Косоротов, Л. В. Щедрина, С. К. Скляренко

Институт физики НАН Украины
46, пр. Науки, 03028, Киев, Украина
+38(044)5257942; +38(044)5251589
lshched@iop.kiev.ua, kosorot@iop.kiev.ua

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ КВАРЦА

В. Ф. Косоротов, Л. В. Щедрина, С. К. Скляренко

Аннотация. В работе рассматривается третичный пироэлектрический эффект, развивающийся в условиях пространственно неоднородного нагрева. Для мониторинга лазерного излучения в видимой и ближней ИК областях спектра предлагается создание пироэлектрических устройств на основе различных кристаллографических срезов кварца. Кварц, относящийся к неполярному пьезоэлектрическому классу, оказывается перспективным материалом для пироэлектрических сенсоров благодаря высокой радиационной стойкости и прозрачности в указанных спектральных областях.

Ключевые слова: третичный пироэлектрический эффект, пространственно неоднородный нагрев, индуцированная поляризация, пироэлектрический сенсор

ПІРОЕЛЕКТРИЧНИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ КВАРЦУ

В. П. Косоротов, Л. В. Щедрина, С. К. Скляренко

Анотація. У роботі розглядається третинний піроелектричний ефект, що розвивається в умовах просторово неоднорідного нагрівання. Для моніторингу лазерного випромінювання у видимій і ближній ІЧ ділянках спектру пропонується створення піроелектричних пристроїв на основі різних кристалографічних зрізів кварцу. Кварц, що відноситься до неполярного п'єзоелектричного класу, виявляється перспективним матеріалом для піроелектричних сенсорів завдяки високій радіаційній стійкості й прозорості в зазначених спектральних областях.

Ключові слова: третинний піроелектричний ефект, просторово неоднорідне нагрівання, індукована поляризація, піроелектричний сенсор

QUARTZ-BASED PYROELECTRIC SENSOR

V. F. Kosorotov, L. V. Shchedrina, S. K. Sklyarenko

Abstract. Tertiary pyroelectric effect under spatially inhomogeneous heating conditions is considered in the paper. It is proposed to create pyroelectric devices based on different crystallographic cuts of quartz for laser radiation monitoring in the visible and near-IR spectral regions. Quartz crystal belonging to nonpolar piezoelectric class has great potential for use in pyroelectric sensors offering a high transmission and high resistance to radiation in specified ranges.

Keywords: tertiary pyroelectric effect, spatially nonuniform heating, induced polarization, pyroelectric sensor

1. Введение

В связи с интенсивным развитием лазерной техники становится актуальной разработка новых измерительных средств. Они могут быть разработаны только на основе новых материалов, обладающих уникальными электрофизическими и оптическими характеристиками. Например, для мониторинга выходного излучения мощных твердотельных лазеров требуются материалы с высокой степенью прозрачности и высокой радиационной стойкостью в ближней и средней ИК областях спектра. В связи с этим особый интерес представляют материалы, относящиеся к неполярным пьезоэлектрическим классам.

Во-первых, в них отсутствует температура перехода и, следовательно, все нелинейные искажения, связанные с нею. Во-вторых, отсутствует также спонтанная поляризация, в связи с чем невозможно ее взаимодействие с электрической компонентой электромагнитной волны. Следовательно, априори при их

использовании достигается измерение предельно высоких значений плотностей энергии и мощности лазерного излучения. Измерительный эффект связан с индуцированием поляризации в процессе облучения благодаря третичному пироэлектрическому эффекту (ТПЭ), существующему во всех ацентричных кристаллах при их неоднородном нагреве [1].

Поведение традиционных пироэлектрических и пьезоэлектрических материалов в условиях пространственно неоднородных внешних воздействий имеет ряд новых свойств очень полезных для их практического применения и в ряде случаев может представлять альтернативу по отношению к синтезу новых материалов, используемых в пироэлектрическом приборостроении. При этом не только возможно получение новых свойств материалов, но и появляются возможности управления этими свойствами, поскольку их характер и направленность полностью определяются симметрией внешних полей и их простран-

ственной ориентацией относительно кристаллографических осей.

Пироэлектрические сенсоры широко используются для измерения временных и энергетических характеристик лазерного излучения. Благодаря их высокой чувствительности при комнатной температуре, неселективности характеристик в широком спектральном интервале и высокому быстродействию они заняли лидирующие позиции в измерительной технике. Однако появление твердотельных интенсивных лазеров с длиной волны в видимой и ближней ИК областях спектра потребовало разработки новых измерительных средств.

Традиционные пироэлектрические устройства, работающие на первичном и вторичном пироэлектрическом эффектах, перестают быть эффективными при измерении мощного излучения этих лазеров из-за сильного перегрева чувствительных элементов, приводящего к нелинейным искажениям, а то и вовсе к их разрушению. В связи с этим использование кристаллов в качестве чувствительных элементов, которые одновременно имели бы пироактивные свойства и достаточно слабое поглощение на длине волны измеряемого излучения, значительно повысило бы пределы измеряемых плотностей излучения (верхнюю границу динамического диапазона). Следует отметить, что совмещение этих свойств является непростой задачей, если учесть, что поглощение излучения пироэлектрическими кристаллами связано в основном с наличием у них спонтанного электрического момента и не может быть уменьшено до требуемых значений.

2. Поляризация кристалла в неоднородных температурных полях

Отклик поляризации в условиях пространственно неоднородного нагрева кристалла принципиально отличается от отклика в однородных температурных полях и проявляется это прежде всего в большом разнообразии физических эффектов, сопровождающих такое воздействие на кристалл. Действительно, однородный нагрев с точки зрения симметрии внешнего воздействия на кристалл характеризуется предельно высокой симметрией $\infty\infty m$ и кристалл сохраняет свою группу симметрии.

В соответствии с принципом Неймана поляризация в этом случае может иметь место только в пироэлектрических классах.

В условиях неоднородного нагрева невозможно в общем случае ввести какую-либо группу симметрии внешнего воздействия, характеризующую весь кристалл. Однако, в одномерных температурных полях такая возможность имеется и в соответствии с принципом Кюри рассматриваемое воздействие сильно понижает симметрию невозмущенного кристалла. При этом в нем могут индуцироваться особенные полярные направления и в отклик поляризации будут давать вклад, вообще говоря, все мультипольные моменты решетки.

В данной работе для создания пироэлектрических устройств с предельно высокими значениями верхней границы динамического диапазона предлагается использование кристаллов, априори не обладающих пироэлектрическими свойствами и имеющих слабое поглощение в видимой и ближней ИК областях спектра. В частности, в качестве такого кристалла в данной работе выбран кварц, который удовлетворяет выше перечисленным требованиям. В условиях неоднородного нагрева в кристалле возникают термоупругие напряжения, которые через пьезоэлектрический эффект индуцируют в нем поляризацию, а с нею электрическое напряжение, пропорциональное энергии или мощности измеряемого излучения.

В принципе этот эффект возможен и при однородном нагреве кристалла, но при наличии пространственно неоднородных граничных условий, в которых он находится [2, 3]. Действительно, в таких условиях следствием однородного нагрева кристалла являются однородные напряжения в его объеме, которые уже вызваны воздействием, отличным от сферического, указанного выше. В таком случае в соответствии с принципом Кюри кристаллическая решетка меняет свою симметрию, приобретая полярные свойства.

Расчет полярного состояния в кристалле, вызванного пространственно неоднородным воздействием на него, с учетом всех видов анизотропии (электрической, тепловой, оптической и упругой) встречает значительные

математические трудности. В тоже время конструирование конкретных устройств требует учета основных особенностей распределения поляризации в кристалле. Применение симметричных методов для получения необходимой информации является очень полезным и может значительно облегчить решение краевых задач. Основные трудности состоят в обосновании применимости самого принципа Кюри в термодинамически неравновесных условиях и получении точечных групп, описывающих симметрию внешнего воздействия, индуцирующего полярное состояние в кристалле.

Нами предложены приближенные методы симметричного анализа, пригодные только для специального вида температурных полей, для которых могут быть разрешены указанные трудности [4]. Основой такого подхода является возможность выделения в объеме неоднородно нагретого кристалла униполярных областей, в каждой из которых группа симметрии тензора термоупругости остается постоянной. Такие особенности поведения кристаллической решетки не являются следствием ее симметрии, а непосредственно следуют из решения уравнений движения, полученных из вариационных принципов. При разбиении кристалла на ряд униполярных областей реализуются состояния, обеспечивающие минимум упругой энергии. Такое поведение кристалла имеет место в одномерных температурных полях или близких к ним, имеющих место в реальных условиях измерения лазерного излучения.

Третичный пирозэффект развивается в неоднородных температурных полях и поэтому полярное состояние в кристалле имеет сложное пространственное распределение. Характер этого распределения зависит не только от способа нагрева кристалла, но и от выбора кристаллографического среза для чувствительного элемента. Это требует разработки принципиально новых схем организации устройств, действующих на основе ТПЭ и учитывающих все особенности полярного состояния, расчет которого становится обязательной задачей.

В работе [5] предложены методы расчета выходного сигнала пирозлектрического сенсора, работающего на третичном пирозэффекте. Приведем результаты этих расчетов для

основных срезов кварца, активных относительно проявления в них ТПЭ. Предположим, что чувствительный элемент в форме круглой кристаллической пластинки толщины ℓ подвержен осесимметричному нагреву синусоидально модулированным потоком излучения частоты ω в полосе прозрачности кристалла ($\mu\ell \ll 1$, μ — коэффициент поглощения в обратных см). Если при этом радиус пучка r_0 удовлетворяет условию $r_0 < R$ (где R — радиус приемной площадки), то на приемной площадке по переменной составляющей будем иметь две температурные области: горячую ($r \leq r_0$) и холодную ($r > r_0$) с переходным слоем, разделяющим эти зоны, с толщиной порядка длины температурной волны $\lambda_T = \sqrt{2a/\omega}$, где a — коэффициент температуропроводности кристалла.

Рассмотрим выражение для групп симметрии внешнего воздействия для этих областей. Для холодной области предельная группа имеет вид

$$G_{\text{воз}} \supseteq \infty / mmm, \quad (1)$$

где в (1) C_∞ — ось вращения бесконечного порядка, перпендикулярная плоскости среза, а m — плоскость симметрии, совпадающая с этой плоскостью. Для горячей области группа внешней симметрии определяется выражением

$$G_{\text{воз}} \supseteq \begin{cases} n/m, & n \text{ и } m \subset G_{\text{кр}} & \text{(a)} \\ I, & n \text{ и } m \not\subset G_{\text{кр}} & \text{(b)} \end{cases}, \quad (2)$$

где I — единичная группа, n — ось вращения n -го порядка, перпендикулярная плоскости пластинки, m — плоскость симметрии, совпадающая с плоскостью пластинки. Группа, определяемая соотношением (2), обладает той особенностью, что она либо равна одной из подгрупп группы n/m , либо в отсутствие элементов симметрии, входящих в группу n/m , равна единичной группе. При этом поляризация проявляется в условиях диссимметрии.

3. Анализ сенсоров на основе различных кристаллографических срезов кварца

Рассмотрим ТПЭ в различных срезах кварца. Обратим внимание, что поскольку кристалл работает в условиях высокой прозрач-

ности, то он предназначается для измерения интенсивных лазерных пучков. Коэффициенты преобразования сенсоров на основе этого кристалла довольно низкие. Срез, перпендикулярный кристаллографическому направлению $[2\bar{1}\bar{1}0]$, в соответствии с принципом Кюри дает группу внешней симметрии $G = 2$ и продольный пирозэффект имеет место для обеих температурных областей пластинки. Этот случай был реализован на эксперименте и дал значение коэффициента преобразования, равное 5×10^{-2} В/Вт в диапазоне частот от 3 до 20 Гц.

Важным для измерительных целей является наличие довольно равномерной зональной чувствительности сенсора, представленной на Рисунке, при условии, что площадь электрода была намного больше площади сечения пучка. Размер зонда составлял 0.1 мм, а размер приемной площадки – 1.5 см. Появление отрицательного сигнала на краях приемной площадки связано с вкладом в сигнал недиагональных компонент тензора термоупругих напряжений, которые меняют знак на противоположный на краю электродов. Смена знака происходит на расстояниях порядка длины температурной волны λ_T .

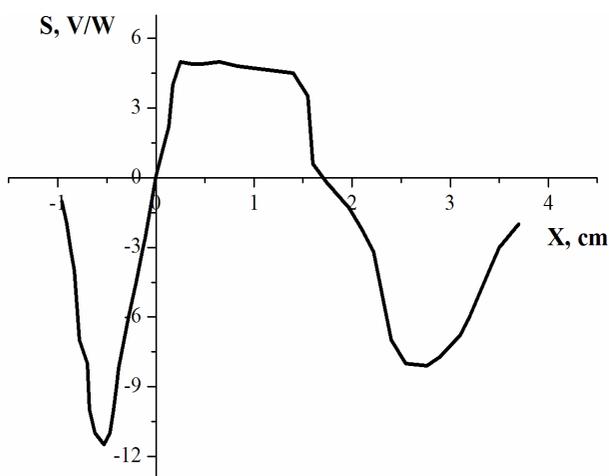


Рисунок. Зональная чувствительность сенсора на основе X_1 -среза кварца

Другой, важный для практических применений срез, перпендикулярный кристаллографическому направлению $[01\bar{1}0]$ (X_2 -срез, где X_2 — кристаллофизическая ось). В этом случае симметричное рассмотрение дает для горячей области поперечный эффект с группой

внешнего воздействия $G \cong 2$ с осью симметрии, лежащей в плоскости среза и совпадающей с кристаллографической осью \bar{a}_1 . В холодной области пластинки, согласно соотношению (2), группа внешнего воздействия совпадает с единичной и поэтому пирозэффект проявляется в условиях диссимметрии. В связи с этим связанный заряд на торцевой поверхности пластинки, непосредственно примыкающей к холодной области кристалла, распределен непредсказуемым образом. Если формировать на этом срезе сенсор, то необходимо избавиться от вклада этой области кристалла в выходной сигнал. Этого можно добиться, если зажать горячую область по ее торцу диэлектрическим кольцом с условием $E_{Ю}^{диэл} > E_{Ю}^{кварц}$ (где $E_{Ю}^{диэл}$ и $E_{Ю}^{кварц}$ — модули Юнга диэлектрического кольца и кварца, соответственно).

Рассмотрим X_3 -срез кварца. Этот случай еще нуждается в экспериментальной проверке, но представляет чисто теоретический интерес. В этом срезе в горячей области кристалла группа симметрии внешнего воздействия совпадает с группой симметрии кристалла и поэтому последняя не меняется при тепловом воздействии на кристалл. Пьезоэлектрический эффект в указанном срезе кварца запрещен по причине равенства нулю всех пьезомодулей $d_{3\lambda}$. В холодной области кристалла, в соответствии с соотношением (2), группа внешнего воздействия $G \cong 3$ и имеет место поперечный эффект. Полученный результат кажется парадоксальным, т.к. возмущенный кристалл с такой группой симметрии относится к пирозэлектрическому классу, но продольный пирозэффект по-прежнему запрещен. Распределение связанного заряда на торцевой поверхности пластинки пропорционально $\sin 3\varphi$ и является инвариантным относительно всех преобразований группы 3.

Совокупность приведенных данных указывает на то, что кварц, являясь неполярным пьезоэлектрическим кристаллом, может быть использован в качестве материала для пирозэлектрических сенсоров. Особенно он эффективен в области его прозрачности в видимой и ближней ИК областях спектра, где коэффициент поглощения может составлять 10^{-3} см $^{-1}$.

Список использованной литературы

- [1]. Най Дж. *Физические свойства кристаллов*. – М.: Мир, 1967. – 380 с.
- [2]. Таганцев А.К., Пиро-, пьезо-, флексо-электрический и термополяризационный эффекты в ионных кристаллах // УФН. – 1987. – Т.152. – вып.3. – С. 423–448.
- [3]. Переверзева Л.П., Поплавко Ю.М., Склярченко С.К., Термопьезоэлектричество в нецентросимметричных кристаллах // ФТТ. – 1992. – Т.34. – № 1. – С. 281–287.
- [4]. Kosorotov V.F., Shchedrina L.V., Symmetric analysis of the induced pyroactivity in radially inhomogeneous temperature fields // UJP. – 2009. – Т.54. – № 1–2. – С. 169–174.
- [5]. Kosorotov V.F., Shchedrina L.V., New functional capabilities of quartz for laser parameters measurements // Quantum Electronics. – 2010. – Т.40, № 3. – С. 271–275.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2014 р.