

УДК 621.378

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КРИСТАЛЛА LiNbO_3 В МИЛЛИМЕТРОВОЙ ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН МЕТОДОМ ГЕНЕРАЦИИ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

К.М. МОВСИСЯН, А.О. МАКАРЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 10 декабря 2003 г.)

Предложен метод для определения диэлектрической проницаемости нелинейных кристаллов в СВЧ диапазоне посредством генерации разностной частоты лазерного излучения. С его помощью экспериментально определена диэлектрическая проницаемость кристалла ниобата лития в миллиметровом диапазоне длин волн. Ошибка измерений в условиях эксперимента порядка 15%.

1. Введение

Изучение диэлектрических свойств вещества представляет как научный, так и практический интерес. Выбор метода измерений определяется многими факторами, среди которых особое значение имеют частотный диапазон, свойства исследуемого материала и способ воздействия на образец. Имеют значение также величины диэлектрической проницаемости и потерь, так как методы, пригодные для образцов с небольшой величиной проницаемости, оказываются непригодными для образцов с высокими значениями ϵ и $\text{tg } \delta$.

Известные методы, особенно в СВЧ диапазоне [1], могут быть лишь крайне осторожно и ограниченно применимы при исследовании сегнетоэлектрических материалов, для которых из-за большого значения ϵ возникают трудности, связанные с вводом СВЧ поля в образец. В связи с этим, высокие значения диэлектрической проницаемости у кристаллов сегнетоэлектриков требуют создания новых методов измерения их параметров. Успешное экспериментальное осуществление генерации разностной частоты (ГРЧ) лазерного излучения в широком диапазоне длин волн (см., например, [2-6]) открывает возможности для определения параметров нелинейных кристаллов в СВЧ диапазоне.

Предлагаемый в работе метод измерения диэлектрической проницаемости нелинейных кристаллов (большинство которых составляют сегнето-

электрики) с помощью ГРЧ лазерного излучения качественно отличается от известных методов. Основное различие этого метода состоит в том, что СВЧ поле не вводится извне, а генерируется в самом кристалле.

Целью настоящей работы являлось определение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического кристалла ниобата лития этим методом. Интерес к кристаллу LiNbO_3 обусловлен множеством его свойств, имеющих большое практическое приложение: использование для генерации второй гармоники, генерации разностной частоты, параметрической генерации света, электрооптических модуляторов, акусто-оптических элементов и т.д. Исследованию диэлектрических свойств этого кристалла в СВЧ диапазоне посвящен ряд работ (см., напр., [7]), но, несмотря на это, до настоящего времени нет полной ясности относительно дисперсии ϵ в этом диапазоне длин волн.

2. Методика измерений

Ниже обсудим возможность экспериментального осуществления измерения диэлектрической проницаемости кристалла LiNbO_3 в миллиметровой области длин волн с использованием процесса ГРЧ лазерных импульсов. Такие измерения могут дать также информацию о дисперсии ϵ . Так как в этой области длин волн наблюдается заметная дисперсия диэлектрической проницаемости многих сегнетоэлектрических материалов, к которым относится также ниобат лития, то ясно, что исследование дисперсии в указанном диапазоне имеет важное практическое значение.

Из выражения для углового распределения мощности разностного излучения можно получить информацию о диэлектрической проницаемости нелинейного кристалла в СВЧ диапазоне. Для параллельных лазерных пучков гауссового профиля угловое распределение мощности дается выражением [8]

$$P(r, \lambda, \theta) = K \frac{r^4 \sin 2\theta \sin^2 \left[\frac{\pi l}{\lambda} (\cos \theta_0 - \cos \theta) \right]}{\lambda^2 (\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta)^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 r^2 \sin^2 \theta}{\lambda^2} \right), \quad (1)$$

где r – радиус пучков, $\cos \theta_0 = n_0 / n$, n и n_0 – коэффициенты преломления кристалла для РЧ и оптического диапазонов, соответственно, l – длина кристалла, а K – параметр, зависящий от свойств нелинейного кристалла и мощностей излучения лазеров.

Величину $\epsilon = n^2$ можно было бы непосредственно определить экспериментально, измеряя абсолютное значение мощности ГРЧ в зависимости от радиусов лазерных пучков. Однако такое измерение связано с определенными трудностями и в этом случае можно допустить значительную ошибку при определении ϵ . Поэтому удобно провести относительное измерение мощности излучения разностной частоты. Зная отношение мощностей для различных значений диаметра лазерных пучков D и пользуясь выражением для

углового распределения мощности (1), нетрудно получить следующее соотношение для ε :

$$\varepsilon = \frac{4\lambda^2 \ln\left(\frac{P_2 D_1^4}{P_1 D_2^4}\right)}{\pi^2 (D_1^2 - D_2^2) \sin^2 \theta} \quad (2)$$

Таким образом, экспериментально измерив $D_{1,2}$ и $P_{1,2}$, можно определить величину диэлектрической проницаемости кристалла ε для различных длин волн.

3. Экспериментальная часть и результаты

Эксперимент осуществлялся на установке, блок-схема которой показана на рис.1. Генерация разностной частоты происходит за счет нелинейного взаимодействия излучений двух частотно-расстроенных рубиновых лазеров. Модуляция добротности резонаторов, образованных зеркалами (1-1), осуществлялась электрооптическими затворами 2. С помощью блока синхронизации 3 добивались полного временного перекрытия лазерных импульсов. Сдвиг частот излучения лазеров осуществлялся нагреванием одного из рубинов 4. С помощью терморегулятора 5 стабильность разности температур поддерживалась с точностью $0,1^\circ\text{C}$, что соответствует сдвигу частоты на 400 МГц. Лазерные пучки через диафрагмы 6 падали на кристалл LiNbO_3 длиной 7 мм, который был помещен в прямоугольный волновод 7 с поперечными размерами $7,2 \times 3,4$ мм. Оптическая ось кристалла и плоскость поляризации возбуждающих пучков были перпендикулярны широкой стенке волновода. В этом случае ГРЧ определяется наибольшей компонентой тензора нелинейной восприимчивости d_{33} кристалла LiNbO_3 , и возбуждаемая в волноводе волна типа H_{10} является основной волной.

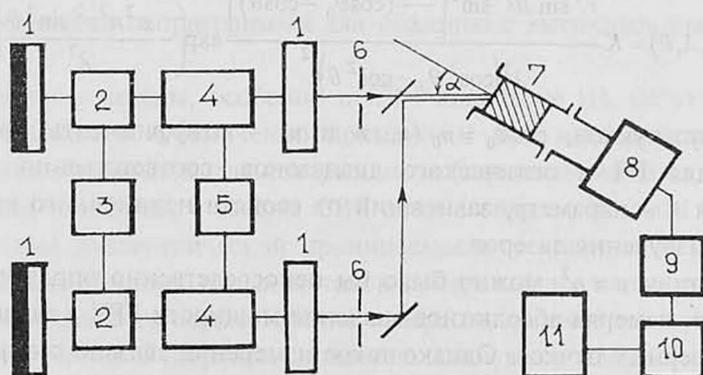


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки.

Излучение разностной частоты через аттенюатор 8 поступало на детекторную секцию 9, выполненную на основе диодов D407 и D607. Сигнал с

выхода детектора через усилитель 10 типа УЗ-33 подавался на осциллограф С8-12. Длительность лазерных импульсов была ~30 нс. Профили пучков были близки к гауссовому. Угловое распределение мощности РЧ в миллиметровой области длин волн имеет четко выраженную лепестковую структуру. Очевидно, что эффективность ГРЧ будет наибольшей, если направление максимальной мощности излучения РЧ в кристалле совпадет с направлением распространения парциальной волны данной частоты в волноводе. Следовательно, экспериментально подбирая углы падения α параллельных лазерных пучков на кристалл, можно обеспечить соответствующие углы распространения θ излучения РЧ в волноводе. Измерения проводились на длинах волн $\lambda=4$ мм и 8 мм, которым соответствуют углы распространения в волноводе $\theta \approx 5^\circ$ и $10,5^\circ$, где сконцентрирована основная часть мощности РЧ [9].

На рис.2 приводятся результаты эксперимента в виде графика зависимости $\ln A$ от B , где использованы обозначения

$$A = \frac{P_2}{P_1} \frac{D_1^4}{D_2^4}, \quad B = \frac{\pi^2}{4} \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} (D_1^2 - D_2^2).$$

Как видно из рисунка, эта зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией. В соответствии с (2), тангенс угла наклона прямой определяет величину ε . Измеренное таким образом значение диэлектрической проницаемости для кристалла LiNbO₃ в миллиметровом диапазоне оказалось равным $30 \pm 4,5$. Заметим, что в силу логарифмического характера соотношения (2), даже небольшие отклонения отношения мощностей от истинного значения могут вызвать сильное изменение наблюдаемой величины ε . Поэтому, для уменьшения ошибки при определении диэлектрической проницаемости кристалла ниобата лития, в пределах возможностей эксперимента мы использовали опытные данные, которые соответствовали наибольшему возможному значению отношения диаметров лазерных пучков. Ошибка измерения при этом была порядка 15%.

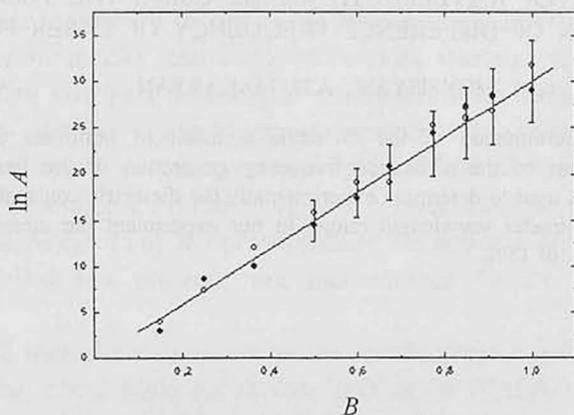


Рис.2. Экспериментальные результаты при $\lambda = 4$ мм (точки) и $\lambda = 8$ мм (светлые кружки).

При той же ориентации кристалла LiNbO_3 , при которой эффективно работает компонента тензора квадратичной нелинейной восприимчивости d_{33} , нами была также измерена диэлектрическая проницаемость кристалла для длины волны $\lambda = 2$ см. В этом случае ГРЧ осуществлялась с помощью лазера на неодимовом стекле, который работает в одномодовом пикосекундном режиме (длительность пуга ~ 150 нс). Отметим, что ГРЧ в кристалле возникает вследствие нелинейного взаимодействия спектральных компонент излучения неодимового лазера. Измеренное таким образом значение ϵ для LiNbO_3 на длине волны $\lambda = 2$ см оказалось равным $49 \pm 7,3$. Ошибка измерения при этом также была порядка 15%. Пиковая мощность СВЧ излучения составляла $10 \div 20$ мВт. Все измерения проводились при комнатной температуре.

В заключение еще раз обратим внимание на то, что предложенный способ может стать эффективным методом определения диэлектрической проницаемости нелинейных кристаллов в СВЧ диапазоне, если добиться достаточной точности в измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Брандт. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963.
2. A.Koster, A.Vossoughi. J. Phys. E. Instrum., 9, 340 (1976).
3. Ю.О.Аветисян, Р.М.Мартirosян, Э.Г.Мирзабекян, П.С.Погосян. Квантовая электроника, 5, 659 (1978).
4. Ю.О.Аветисян, А.О.Макарян, К.М.Мовсисян, П.С.Погосян. Письма в ЖТФ, 5, 233 (1979).
5. K.Kawase, T.Taniuchi, H.Ito. Opt. Lett., 24, 1605 (1999).
6. Y.S.Lee, T.Mead, et al. Appl. Phys. Lett., 76, 2505 (2000).
7. Ю.М.Поплавко, В.В.Мериакри и др. ФТТ, 15, 1473 (1973).
8. У.А.Абдулин, Г.А.Ляхов, О.В.Руденко, А.С.Чиркин. ЖЭТФ, 66, 1295 (1974).
9. А.О.Макарян, К.М.Мовсисян, П.С.Погосян. ЖПС, 41, 908 (1984).

MEASUREMENT OF THE DIELECTRIC CONSTANT OF LiNbO_3 CRYSTAL IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE USING THE TECHNIQUE OF GENERATION OF DIFFERENCE FREQUENCY OF LASER PULSES

K.M. MOVSISYAN, A.H. MAKARYAN

A technique for determination of the dielectric constant of nonlinear crystals in the microwave range by means of the difference frequency generation of the laser radiation is proposed. The method was used to determine experimentally the dielectric constant of the lithium niobate crystal in the millimeter wavelength range. In our experiment the measurements were performed with an accuracy of 15%.