

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА НА КРИСТАЛЛАХ KDP

Рассматриваются вопросы, связанные с расчетом модема света на электрооптическом кристалле KDP, основных размеров резонатора в диапазоне частот 600...2400 МГц, что определяет эффективность работы модема света, приводящего к повышению точности измерений светодальномера. Предложена эмпирическая формула для определения размеров резонатора и приведены результаты расчетов в диапазоне 600...2400 МГц, что показывает высокую точность расчетов. Показана также, что добротность резонатора зависит не только от материала, но и от качества обработки внутренней поверхности коаксиального резонатора.

Ключевые слова: *внутренний проводник, резонансная частота, емкость кристалла, добротность, обработка резонатора*

В диапазоне частот 600...2400 МГц для построения высокоточных светодальномеров эффективно применяются модуляторы света на кристаллах KDP и ниобата лития $LiNbO_3$. Элементы определенных размеров этих кристаллов помещаются в емкостной зазор объемного тороидального резонатора, который подключается к СВЧ генератору через кабель связи (рис.1). Эффективность модулятора света при этом в основном определяется типом волны, возбуждаемой в резонаторе, размерами и добротностями кристалла и резонатора, а также качеством обработки резонатора и контактов кристалла.

К настоящему времени существует множество методов расчета резонаторных модуляторов. Однако необходимо учитывать тот факт, что если на сравнительно низких частотах (до 300 МГц) применение наиболее грубых методов расчета параметров модуляторов дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными результатами, то с повышением частоты модуляции расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами значительно возрастают.

При заданной частоте модуляции света первоначальным является тип возбуждаемой волны, на основе которого уточняется применимость той или иной формулы для определения основных размеров резонатора, кристалла и распределения электрического поля в резонаторе. На волне TEM в коаксиальных резонаторах основное выражение для расчета резонатора является уравнение в виде [1]

$$\frac{4,77\lambda_m}{C_p + C_{kp}} = 60 \ln \frac{D}{d} \operatorname{tg} \frac{2\pi \ell}{\lambda_m}. \quad (1)$$

По мере повышения частоты модуляции и перехода от волны типа TEM к другим типам волн, возбуждаемым в резонаторах, расчетные формулы изменяются и предлагаются в видах [2,3]

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi H}{\lambda_m} = \frac{\lambda_m}{2\pi C_{kp}}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta}{\lambda_m} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg}(\omega_m CZ_L), \quad (3)$$

где λ_m – длина волны модуляции света, $C_{кр}$, C_p и C – соответственно емкости кристалла, резонатора (модулятора без кристалла) и модулятора, $60 \ln \frac{D}{d} = Z_2$ – волновое сопротивление резонатора, Δ – величина, на которую отличается длина резонатора H от величины $\lambda_m/4$. Остальные величины показаны на рис.1.

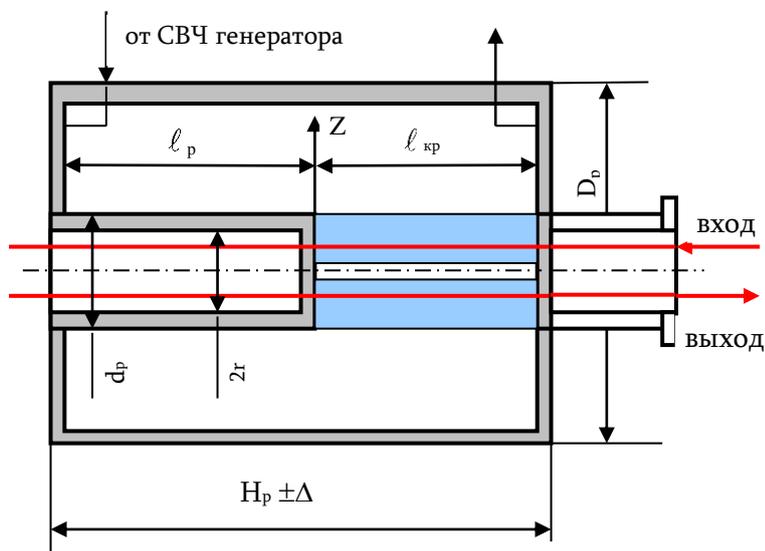


Рис. 1. Продольное сечение модема света с коаксиальным резонатором

Результаты, которые получаются по этим формулам, отличаются от реальных размеров резонаторов в 2...3 раза и возникает необходимость повторного изготовления новых резонаторов. Особенностями резонаторов на волне ТЕМ является малое отношение D/d и значительная длина резонатора $H > D$. Это приводит к повышению емкости резонатора, в результате чего его размеры на низких частотах получаются практически приемлемые. Однако, нагруженная добротность Q_n таких модуляторов невысокая, например, на частоте 600 МГц ($H=120$ мм, $d=14$ мм, $D=90$ мм) на кристалле KDP с размерами 10x10x35 мм вместо возможной $Q_n=500$ получается в 1,5 раза меньше, $Q_n=350$, а расчетная длина резонатора больше реальной [4]. Другим недостатком такого модулятора является то, что электрическое поле разделяется на аксиальное и радиальное составляющие. На кристалл KDP, который можно установить, как радиально, так и аксиально, действует почти половина всего поля резонатора. На высоких частотах мощность модуляции возрастает и необходимо по мере возможности направить все поле резонатора на кристалл.

Исследования свойств модулятора света на частотах 600...2400 МГц показали, что в резонаторах возбуждаемая волна зависит от длины резонатора H_p и отношения D/d . Причем, в зависимости от величины емкости кристалла длина резонатора может быть меньше или больше от четвертьволнового резонатора (рис.1).

Различными методами определено, что в диапазоне частот 850...2400 МГц возможно построить модуляторы света на продольном ЭОЭ, в которых при отношении размеров резонатора $D/d \geq 4$ и $H_p \geq D_p$ в зоне установки кристалла возбуждается волна типа E_{01} , обычно возбуждаемая в цилиндрических резонаторах с внутренним проводником [2]. В этом случае величину напряженности электрического поля по длине кристалла в первом приближении можно оценить выражением

$$E_z = \frac{377 A}{1 + \epsilon S} \cdot J_0 \left(\frac{4,8r}{D} \right) \cdot \cos \frac{\pi Z}{2 \ell_{кр}}, \quad (4)$$

где A -произвольная постоянная, в основном зависящая от размеров и качества обработки резонатора, S - поперечное сечение кристалла, Z - координата точки по длине кристалла, $Z=0$ означает начало кристалла.

Согласно выражению (4), напряженность электрического поля максимальна на торце кристалла ($Z=0$), входящего в контакт с внутренним проводником резонатора. В конце кристалла ($Z=\ell_{кр}$) поле равно нулю. Электрические силовые линии начинаются с торца резонатора и замыкаются на торец, где установлен кристалл, достигая максимума на торце внутреннего проводника.

$$\text{Амплитудное значение поля } E_z = \frac{377A}{I + \varepsilon S},$$

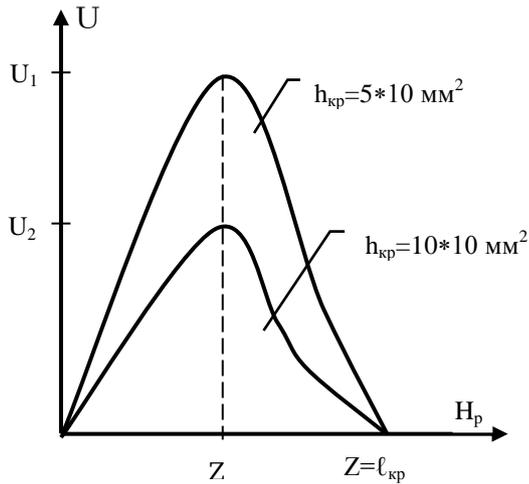


Рис. 2. Распределение электрического поля по длине резонатора

имеющего место при $Z=r=0$ зависит от отношения D/d , типа и размеров кристалла. Распределение напряженности поля по длине кристалла KDP различного сечения в резонаторе с размерами $D=70 \text{ мм}$, $d=14 \text{ мм}$, $\ell=28 \text{ мм}$ и $\ell_{кр}=35 \text{ мм}$ приведено на рис. 2. Получено, что для СВЧ модуляторов света целесообразно применить кристаллы небольшого сечения с малой диэлектрической проницаемостью ε . В этом отношении кристаллы ADP имеют преимущества перед KDP. Кроме того, лучше всего, чтобы световой луч проходил через центр резонатора, где концентрация силовых линий поля является максимальной. Неравенство в центре резонатора магнитных силовых линий поля нулю

($H_\phi \neq 0$) обусловлено емкостной нагрузкой резонатора, образованной через внутренний проводник.

Резонансная длина волны для вышеуказанного резонатора, составляла 250 мм , т.е. $f = 1200 \text{ МГц}$. Длина резонатора при этом получается $H_p = \ell_p + \ell_{кр} = 63,1 \text{ мм}$, что на $0,6 \text{ мм}$ больше, чем четверть длины резонансной волны $\lambda/4 = 62,5 \text{ мм}$, т.е.

$$H_p = \ell_p + \ell_{кр} = \lambda/4 - \Delta. \quad (5)$$

Величину Δ можно определить выражением следующего вида

$$\text{tg} \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \omega Z_p (C_{кр} - C_p), \quad (6)$$

в котором, подставляя значения Δ из (5), получим выражение для определения длины внутреннего проводника резонатора, что равносильно определению длины H_p резонатора.

$$\ell_p = \frac{\lambda}{4} - \ell_{кр} - \frac{\lambda}{2\pi} \text{arctg} 2\pi f Z_p (C_{кр} - C_p). \quad (7)$$

Из этого выражения следует, что при $C_p = C_{кр}$ имеет место $H_p = \ell_p + \ell_{кр} = \lambda/4$.

При постоянном сечении кристалла увеличение емкости $C_{кр}$, так что $C_{кр} \geq C_p$ длина внутреннего проводника или резонатора уменьшается $H_p \leq \lambda/4$ и наоборот, при уменьшении емкости кристалла $C_{кр} \leq C_p$ увеличивается длина резонатора $H_p \geq \lambda/4$.

Величины емкостей $C_{кр}$ определяются выражением $C_{кр} = \varepsilon S / 4\pi \ell_{кр}$, а C_p образуется из двух компонентов $C_p = C_{заз} + C_{пог}$, где $C_{заз}$ – емкость зазора резонатора, в котором устанавливается кристалл, $C_{пог}$ – погонная емкость резонатора.

Для C_p применимо выражение, которое согласуется с экспериментальными результатами

$$C_p = 0,27 \left(2 \ln \frac{D}{d} + d^2 / \ell_{кр} \right) [n\Phi]. \quad (8)$$

Определенные таким образом величины C_p в диапазоне частот 600...2400 МГц находились в пределах $C_p = (0,30 \dots 0,45)$ см.

Применением (7) и (8) определены длины резонаторов для модуляторов в диапазоне частот 600...2400 МГц. На частотах 2400 МГц и выше возможно получение отрицательной величины ℓ_p . Это означает, что на этой частоте длина резонатора должна быть увеличена на $\lambda/2$. Добавление к длине резонатора целых чисел полуволин не изменяет резонансную частоту.

Незначительное расхождение между расчетными и реальными величинами в табл. 1 показывает высокую точность расчетов. Некоторое несоответствие, переведенное на частоту, составляет 25...30 МГц, которое легко компенсируется перестроочными элементами модулятора.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров резонаторов с $\ell_{кр}=35$ мм

$f, \text{МГц}$	D/d	$h_{кр}$	$C_{кр}$	C_p	ℓ_p	$\ell_{экс.}$	$\Delta \ell = \ell_{экс.} - \ell_p$
600*	90/14	12	0,45	0,30	84,0	82	-2,0
800	75/13	10	0,45	0,34	55,5	55	0,5
1200	75/13	5**	0,11	0,45	38,2	45	6,8
2400	65/14	10	0,45	0,35	21,0	20	-1,0

*- Имеет место неравенство $H > D$.

** - емкость кристалла намного меньше емкости резонатора

Для оценки влияния изменения длины кристалла при его постоянном сечении на длину резонатора в небольшом диапазоне частот в табл. 2 сопоставлены расчетные и реальные величины ℓ_p на частотах 1200 ± 50 МГц. Полученные результаты позволяют сказать, что формула (7) достаточно точно характеризует размеры резонаторов для модуляторов света на продольном электрооптическом эффекте (ЭОЭ).

Таблица 2

Результаты расчета размеров резонатора на частоте $f=1200 \pm 50$ МГц

D/d	ℓ_p	$h_{кр}$	$C_{кр}$	C_p	ℓ_p	$\ell_{экс.}$
65/14	35	10	0,45	0,38	28,2	28,8
	30		0,53	0,35	27,0	26,2
	25		0,64	0,32	26,1	25,5
	20		0,80	0,30	26,6	25,0
	25	7*14	0,62	0,34	27,0	26,0
70/15	25	8*14	0,71	0,34	26,0	25,0
70/20	25	7*16	0,42	0,42	27,5	29,0

В некоторых случаях, например при $H_p > D_p$ и резком изменении размеров кристалла ошибка в величине ℓ_p , определенной по (7), может оказаться больше 10...15%. В таких случаях повышение резонансной частоты компенсируется уменьшением длины кристалла на 1...2 мм или диаметра внутреннего проводника на 0,5...1 мм, а пониженная частота восстанавливается уменьшением длины внутреннего проводника на 0,4...0,6 мм или сечения кристалла путем шлифовки острых граней по длине кристалла.

В диапазоне СВЧ качество работы модулятора света, в основном, зависит от качества обработки внутренней поверхности резонатора и контактов, между которыми устанавливается кристалл. Для оценки качества работы модулятора света используются добротность кристалла $Q_{кр}$ и резонатора Q_p .

В диапазоне частот 800...2400 МГц для определения величины добротности лучшее соответствие с реальной добротностью резонатора имеет выражение [2]

$$Q_{кр} = \frac{H}{\delta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{H}{D} \cdot \frac{1 + D/d}{\ln D/d}}, \quad (9)$$

где $\delta = 3,7 \cdot 10^{-5} K_1 \sqrt{\lambda(\text{см})}$, K_1 – коэффициент, характеризующий материал резонатора.

Таблица 3
Величины коэффициента K_1

Материал	K_1
Серебро	1,00
Медь	1,02
Золото	1,20
Алюминий	1,40
Цинк	2,00
Латунь	2,20

Величины K_1 приведены в табл. 3.

При экспериментальном определении величины добротности всегда допускается ошибка 5...7%. В связи с этим и тем, что для рассмотренных резонаторов (табл. 1 и 2) имеет место $H \approx D$, то (9) можно использовать в виде

$$Q_{кр} = \frac{H}{\delta} \left/ \left(1 + \frac{1 + D/d}{\ln D/d} \right) \right. . \quad (10)$$

Величина добротности, рассчитанной по формуле (10) для резонаторов, указанных в табл. 1 и 2, невелика и равна $Q_p = 3000$. Однако, у всех резонаторов, полированных вручную, реальная добротность составляет $Q_p = 1500...1600$. Добротность резонатора на частотах 1150...1250 МГц, покрытого серебром и снова полированного вручную составила $Q_p = 2500$. Только при специальной полировке до зеркальной поверхности возможно получить $Q_p = 3000$.

Эти результаты указывают на то, что в (10) должна быть внесена поправка на качество обработки резонатора, т.е. в выражении δ наряду с учетом коэффициента K_1 должен быть и коэффициент K_2 , учитывающий степень обработки резонатора.

$$\delta = 3,7 K_1 K_2 \sqrt{2} . \quad (11)$$

Величины K_2 , определенные экспериментальными измерениями на резонаторах в зоне одной частоты, обработанных различными степенями полировки внутренней поверхности резонатора, приведены в табл. 4.

Обеспечение высокой добротности модулятора вызвано высокой добротностью кристалла, равной $Q_p = 2000$. Поскольку добротность модулятора определяется добротностями Q_p и $Q_{кр}$

$$Q_n = Q_p \cdot Q_{kp} / (Q_p + Q_{kp}), \quad (12)$$

то добротность резонатора Q_p должна быть как можно больше, чтобы максимально была использована добротность кристалла.

Таблица 4
Величины коэффициента K_2

Поверхность резонатора	Коэфф. K_2
Зеркальная	1,0
Полузеркальная	1,2
Полировка без покрытия	1,8
Средняя полировка без покрытия	2,2

Таким образом, можно сказать, что построен и успешно работает электрооптический модулятор с нагруженной добротностью Q_n равной 500, в котором уменьшен температурный градиент. В лазерных дальномерах СВЧ диапазона будут применяться, в основном, модуляторы света на кристаллах KDP применением

принципов формирования парафазных сигналов. В диапазоне частот 600...2400 МГц возможно достаточно точно расчетным путем определить основные параметры электрооптического модулятора на кристаллах KDP.

**Ե.Ն.Հայրապետյան,
Հ.Ա.Հունանյան,
Վ.Գ.Հարությունյան**

KDP ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՎ ԼՈՒՅՍԻ ՄՈՂՈՒԼՅԱՏՈՂՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՆԸ

Դիտարկվում են հարցեր, կապված KDP էլեկտրաօպտիկական բյուրեղներով լույսի մոդեմի 600...2400 ՄՀց հաճախականային տիրույթում ռեզոնատորի հիմնական պարամետրերի հաշարկի հետ, ինչը որոշում է մոդեմի աշխատանքի արդյունավետությունը, որն էլ իր հերթին բերում է լուսահեռաչափի չափման ճշտության բարձրացմանը: Ռեզոնատորի չափերի որոշման համար առաջարկված է էմպիրիկ բանաձև և բերված են հաշվարկի արդյունքները 600...2400 ՄՀց տիրույթում, որոնք փաստում են հաշվարկների մեծ ճշտությունը: Ցույց է տրված նաև, որ ռեզոնատորի բարորակությունը կախված է ոչ միայն պատրաստող նյութի տեսակից, այլ նաև կոաքսյալ ռեզոնատորի ներքին մակերևույթի մշակման որակից:

Առանցքային բառեր. *ներքին հաղորդիչ, ռեզոնանսային հաճախականություն, բյուրեղի ունակություն, բարորակություն, ռեզոնատորի մշակում*

**Ե.Ն.Հայրապետյան,
Կ.Ա.Հունանյան,
Վ.Գ.Հարությունյան**

CALCULATION OF PARAMETERS OF LIGHT MODULATORS ON KDP CRYSTALS

Questions related to the calculation of the light modem on electrooptical crystals KDP, the main dimensions of the resonator in the frequency range 600-2400 MHz, which determines the efficiency of the light modem, leading to an increase in the accuracy of measurements of the light rangefinder are considered. An empirical formula is proposed for determining the dimensions of the resonator and the calculation results in the range of 600-2400 MHz are presented, which shows a high accuracy of

calculations. It is also shown that the quality factor of the resonator depends not only on the material, but also on the quality of processing the inner surface of the coaxial resonator.

Keywords: internal conductor, resonance frequency, crystal capacitance, Q-factor, cavity treatment

Литература

1. Радиопередающие устройства/ М. С.Шумилин, О. В. Головин, Э.А.Шевцов, В.П. Севальнев.– М.: Радио и связь, 1990. – 408 с.
2. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. т.1. – Л.: Госэнергоиздат, 1960.
3. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. - М.: Недра, 1970. - 296 с.
4. Модем света парафазного светодальномера / А.Бегларян, К.Гюнашян, С.Казарян, Е.Айрапетян // Изв. ЕГУАС. – 2010. – N 4. - С.57-62.

Աշխատանքն իրականացված է ՀՀ պետական բյուջեից զիտական և գիտաստեղծական գործունեության բազային ֆինանսավորմամբ «Երկրակեղևի սեյսմոգեն խզվածքներում տեղաշարժերի գրանցում և գեոդեզիական մոնիտորինգի իրականացում լազերային չափիչ գերձշգրիտ սարքերի կիրառմամբ» ծրագրի շրջանակում:

Հայրապետյան Եղիաբեթ Հակոբի, ս.գ.թ., դոց. (ՀՀ, ք.Երևան) – ՃՀՀԱՀ, ակ. Ռ.Սովսիսյանի անվ. Ինժեներական գեոդեզիայի պրոբլեմային լաբորատորիա, ակ.գ.ա. Ինժեներական գեոդեզիայի ամբիոն, լաբ. վարիչ, (+374)77369227, helizabet@yandex.ru, **Հունանյան Հովնան Արթուրի, ֆ-վ.գ.թ.** (ՀՀ, ք.Երևան) – ՃՀՀԱՀ, ակ. Ռ.Սովսիսյանի անվ. Ինժեներական գեոդեզիայի պրոբլեմային լաբորատորիա, գ.ա., (+374)91561041, hovnan2006@yahoo.com, **Հարությունյան Վաղարշակ Գագիկի** (ՀՀ, ք.Երևան) – ՃՀՀԱՀ, ակ. Ռ.Սովսիսյանի անվ. Ինժեներական գեոդեզիայի պրոբլեմային լաբորատորիա, գ.ա., (+374) 91650033, vahar@rambler.ru
Այրապետյան Եցիսաբետ Ասոպովնա, կ.տ.ն., ծոց. (ՐԱ, շ.Երևան) – НУАСА, Проблемная лаборатория Инженерной геодезии им. акад. Р.Мовсисяна, с.н.с., зав. лаб. Инженерной геодезии (+374)77369227, helizabet@yandex.ru, **Унаниян Овнан Альбертович, к.ф.-м.н.** (ՐԱ, շ.Երևան) – НУАСА, Проблемная лаборатория Инженерной геодезии им. акад. Р.Мовсисяна, н.с., (+374)91561041, hovnan2006@yahoo.com, **Арутюнян Вагаршак Гагикович** (ՐԱ, շ.Երևան) – НУАСА, Проблемная лаборатория Инженерной геодезии им. акад. Р.Мовсисяна, н.с., (+374) 91650033, vahar@rambler.ru
Harutyunyan Yegisabeth Hakob, Doctor of Philosophy (Ph.D) in Engineering, assistant prof. (Yerevan, RA) – NUACA, Problem Laboratory of Engineering Geodesy by Academician R. Movsisyan, Head of the Problem laboratory of Engineering Geodesy, (+374) 77369227, helizabet@yandex.ru; **Hunanyan Hovnan Candidate of Physical and Mathematical Sciences** (Yerevan, RA) - NUACA, Problem Laboratory of Engineering Geodesy by Academician R. Movsisyan, Senior Researcher, (+374) 091561041, hovnan2006@yahoo.com **Harutyunyan Vagharshak Gagik** (Yerevan, RA) – NUACA, Problem Laboratory of Engineering Geodesy by Academician R. Movsisyan, research worker, (+374) 91650033 vahar@rambler.ru

Ներկայացվել է՝ 03.11.2017թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 16.11.2017թ.