

ИНДЕКС 3649

Препринт ФФИ-1232(18)-90

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԶԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE

Э.М.ЛАЗИЕВ, А.С.НИКОГОСЯН

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УКИ СВЕТА В СВЧ
ДИАПАЗОН В ВОЛНОВОДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ НЕЛИНЕЙНЫМ
КРИСТАЛЛОМ



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Ереванский Физический
Институт
Зал препринтов

ЦНИИатоминформ
ЕРЕВАН-1990

Է.Մ.ԼԱԶԻԵՎ, Ա.Ս.ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ*

ՈՉ-ԳԵԱՅԻՆ ԲՅՈՒԿԵՂՈՎ ՄԱՍԱՄԲ ԼՅՎԱՅ ԱԼԻՔԱՏԱՐՈՒՄ

ԼՈՒՅՍԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ՓՈՒՍԱՐԿՈՒՄԸ ԳՔՀ ՏԻՐՈՒՅԹԸ

Ուսումնասիրված է օպտիկական մառազայթման ԳՔՀ տիրույթի փոխարկման արդյունավետության մեծացման հնարավորությունը: Այդ նպատակին հասնելու համար օգտագործվում է ոչ-գծային բյուրեղը, որը տեղավորվում է ալիքատարներում $3,4.7,2\text{մմ}^2$, $1,7.3,4\text{մմ}^2$ և այլ չափի կտրվածքներով: Ստացված փորձարարական արդյունքները համադրվում են հաշվարկայինների հետ:

Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1990

* Երևանի պետական համալսարան

E.M. LAZIEV, A.S. NIKOGHOSSIAN*

EFFICIENT TRANSFORMATION OF ULTRA-SHORT LIGHT PULSES INTO THE UHF RANGE IN A WAVEGUIDE PARTIALLY FILLED WITH A NON-LINEAR CRYSTAL

The probability of increasing of the efficiency of transformation of light into the UHF range by means of a non-linear crystal partially filling the transverse cross section of the waveguide is investigated. By varying the partial filling one can achieve the condition of phase synchronism and a corresponding increase in the coherence length. The experimental results for different crystals placed in waveguides with cross sections $3.4 \times 7.2\text{mm}^2$, $1.7 \times 3.4\text{mm}^2$, etc., are presented. The obtained experimental data are compared with the theoretical ones.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1990

* Yerevan State University

Э.М.ЛАЗИЕВ, А.С.НИКОГОСЯН*

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УКИ СВЕТА В СВЧ
ДИАПАЗОН В ВОЛНОВОДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ НЕЛИНЕЙНЫМ
КРИСТАЛЛОМ

Исследована возможность увеличения эффективности преобразования оптического излучения в СВЧ диапазон с помощью нелинейного кристалла, частично заполняющего поперечное сечение волновода. Степень частичного заполнения можно добиться условия фазового синхронизма и соответствующего увеличения длины когерентности. Приводятся экспериментальные результаты для различных кристаллов, помещаемых в волноводы сечениями $3,4 \times 7,2 \text{ мм}^2$, $1,7 \times 3,4 \text{ мм}^2$ и др. Полученные экспериментальные данные сопоставляются с расчетными.

Ереванский физический институт
Ереван 1990

* Ереванский государственный университет

Современные методы получения ультракоротких импульсов (УКИ) лазерного излучения позволяют перекрывать диапазон частот от ЗУФ до дальнего ИК, где частоты смыкаются с субмиллиметровым и миллиметровым диапазонами СВЧ. Генерация таких УКИ СВЧ диапазона имеет важное значение для развития быстродействующей электроники, систем передачи и обработки информации.

За последнее десятилетие развиты четыре совершенно разных метода получения ультракоротких импульсов микроволнового излучения.

Первый метод, использующий Джозефсоновский переход, имеет временное разрешение 4 псек, но из-за низкотемпературных условий работы его практическое применение ограничено [1].

Второй метод - формирование электрических УКИ с помощью полупроводниковых оптоэлектронных переключателей с временным разрешением ниже 2 псек и динамическим диапазоном 10^7 [2].

Третий метод основан на эффекте Покаяльса с временным разрешением ~ 50 псек.

Четвертый метод - нелинейное оптическое преобразование УКИ света в СВЧ диапазон, использующее нелинейное взаимодействие спектральных компонент УКИ света в среде с квадратичной нелинейностью.

ностью [3 - 6].

Последний метод используется, в частности, для создания высокоскоростных детекторов и смесителей оптического диапазона. Традиционно применяемые в оптических системах связи детекторы и смесители на основе полупроводников (например, диод с барьером Шоттки) имеют полосу 100 ГГц. Ограниченность их быстрого действия, связанная с рядом факторов (диффузией носителей, переходной емкостью, временем прохода используемого слоя), устраняется использованием в качестве широкополосных детекторов нелинейных материалов. В них высокочастотные компоненты оптического излучения детектируются биеением, а генерируемое излучение разностных частот (ИРЧ) СВЧ диапазона в дальнейшем повторно легко детектируется гетеродинным методом [7-9]. При обеспечении эффективного преобразования частоты вместо гетеродинной техники, упрощая при этом измерения, можно использовать СВЧ детекторы [6,9].

Процесс нелинейного преобразования частоты происходит наиболее эффективно, если для взаимодействующих волн выполняются одновременно законы сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega_1 \pm \hbar\omega_2 = \hbar\omega_3, \quad (1)$$

$$\hbar\vec{k}_1 \pm \hbar\vec{k}_2 = \hbar\vec{k}_3. \quad (2)$$

При выполнении условия (2) и отсутствии дисперсии среды волна нелинейной поляризации и волна ИРЧ совпадают по фазе в любой точке пространства. В реальной диспергирующей среде ус-

ловие (2) сохраняется лишь на расстоянии, не превышающем длины когерентности [5].

$$L_k = \frac{\lambda_{\text{ИРЧ}}}{2 | n(\lambda_{\text{опт}}) - \lambda_{\text{опт}} \frac{\partial n}{\partial \lambda_{\text{опт}}} - n(\lambda_{\text{ИРЧ}}) | }, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{ИРЧ}} = \lambda_1 - \lambda_2$, а λ_1 и λ_2 - длины волн в спектре лазерного излучения, $n(\lambda_{\text{опт}})$ и $n(\lambda_{\text{ИРЧ}})$ - показатели преломления волн соответственно в оптическом и СВЧ диапазонах.

Поскольку большинство нелинейных кристаллов в СВЧ диапазоне обладают большой диэлектрической проницаемостью (см. табл. I) и слабой дисперсией (выше областей пьезорезонансов), L_k , как следует из табл. I, меньше $\lambda_{\text{ИРЧ}}/2$.

Например, для кристалла LiNbO_3 , дисперсией показателя преломления которого можно пренебречь, в области $10^7 - 10^{13}$ ГГц [10] в случае коллинеарного взаимодействия типа $ee \rightarrow e$, $L_k(\lambda_{\text{ИРЧ}} = 3,2 \text{ см}) = 5,2 \text{ мм}$, $L_k(\lambda_{\text{ИРЧ}} = 2 \text{ мм}) = 0,3 \text{ мм}$. Следовательно, для сантиметрового и миллиметрового диапазона $L_k < 5 \text{ мм}$.

Увеличение L_k на несколько порядков возможно при помещении кристалла в волновод так, чтобы он заполнял лишь часть его поперечного сечения. При этом степень частичного заполнения можно добиться выполнения условия синхронизма и обеспечить при данной длине кристалла эффективное преобразование оптического излучения в СВЧ диапазон.

Синхронное взаимодействие типа $ee \rightarrow e$, как следует из (3), имеет место только для нулевой частоты, так как для остальных частот $V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{ИРЧ}}) < V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{опт}})$. Если кристалл полностью

Таблица I

Показатели преломления нелинейных кристаллов

Кристалл и длина волны (МКМ)	n^o	n^e	$n^o(\lambda_{\text{ИРЧ}})$	$n^e(\lambda_{\text{ИРЧ}})$	Класс
LiNbO_3 I,06	2,237	2,1567	6,7823	5,2915	3m
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ I,06	1,50835	1,46895	6	3,74165	$\bar{4}2m$
KN_2PO_4 I,06	1,49535	1,46041	5,82237	4,47213	$\bar{4}2m$
SiO_2 I,06	1,53514	1,54392	2,14	2,0664	32
LiTaO_3 I,2	2,175	2,18	7,1414	6,5574	3m
ZnTe 0,6943	2,92		3,2		$\bar{4}3m$
GaAs I,127	3,455		3,3912		$\bar{4}3m$

заполняет поперечное сечение волновода, волна ИРЧ замедляется в $m = \lambda_0/\lambda = c/V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{ИРЧ}})$ раз, при этом c — величина постоянная, а фазовая скорость $V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{ИРЧ}})$ меньше фазовой скорости распространения волны нелинейной поляризации. Как уже отмечалось выше, обеспечить условие фазового синхронизма или равенства фазовых скоростей ИРЧ и лазерного излучения в кристалле воз-

можно, если волновод частично заполнен кристаллом. При этом величину m можно изменить в пределах $0 < m < \sqrt{\epsilon}$. Выбрав степень заполнения t кристаллом волновода, можно подобрать такое значение m , при котором фазовая скорость ИРЧ будет равна фазовой скорости волны нелинейной поляризации [9].

Эта методика особенно применима к кристаллам, у которых для выполнения фазового синхронизма двулучепреломление недостаточно или отсутствует. Например, для кристалла ZnTe ($\chi_{14} = 365 \cdot 10^{-8}$ CGSE, для сравнения $\chi_{33}(\text{LiNbO}_3) = 173 \cdot 10^{-8}$ CGSE), несмотря на достаточно большое значение нелинейной восприимчивости, коллинеарный фазовый синхронизм невозможен, так как он — кристалл кубической симметрии. Следовательно, в этом случае эффективное преобразование возможно за счет увеличения относительной длины когерентности коллинеарного взаимодействия.

В свободном от диэлектрика волноводе фазовая скорость ИРЧ больше скорости света, а при полном — меньше ($V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{ИРЧ}}) = c/\sqrt{\epsilon_{\text{ИРЧ}}(\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2} \ll \sqrt{\epsilon_{\text{опт}}}$, так как $n(\lambda_{\text{ИРЧ}}) > n(\lambda_{\text{опт}})$). В случае частичного заполнения $V_{\text{ф}}(\lambda_{\text{ИРЧ}})$ определяется для данной $\lambda_{\text{ИРЧ}}$ численно, из известного дисперсионного уравнения [11].

Для коллинеарного взаимодействия волн типа $ee \rightarrow e$, $oe \rightarrow e$ в кристаллах SiO_2 , LiNbO_3 , LiTaO_3 , KN_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ были рассчитаны коэффициенты замедления m как для несимметричного, так и для центрально-симметричного расположения пластины в прямоугольном волноводе (рис.1). В программу вводились соответствующие значения $\epsilon^o(\lambda_{\text{ИРЧ}})$, $\epsilon^e(\lambda_{\text{ИРЧ}})$, приведенные табл. I. Рекомендуемые значения толщин кристаллов при центрально-симметричном расположении, когда волновод с

кристаллом одновременно является и нелинейным преобразователем частоты, и замедляющей системой для обеспечения эффективной генерации ИРЧ, приведены в табл.2.

На рис.2 представлена схема экспериментальной установки для исследования генерации ИРЧ. В установке использовался набор сменных волноводов сечениями $3,4 \times 1,7 \text{ мм}^2$, $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$, $11 \times 5,5 \text{ мм}^2$, $16 \times 8 \text{ мм}^2$, $19 \times 9,5 \text{ мм}^2$, $23 \times 10 \text{ мм}^2$ с соответствующим заполнением. Для широкополосного согласования используемые кристаллы имели клинообразный выходной срез. Исследования проводились с кристаллами различной толщины и длиной от 8 до 22 мм.

Типичные осциллограммы цугов ИРЧ, возбуждаемых в пластине УКИ лазера на стекле с неодимом при ее $\rightarrow e$ взаимодействии, приведены на рис.3 и 4. Сигнал ИРЧ в волноводах сечениями $3,4 \times 7,2 \text{ мм}^2$ и $9,5 \times 19 \text{ мм}^2$ регистрировался с помощью предварительно откалиброванных детекторных и смесительных диодов Д606 и Д608, 2А101 соответственно.

Зависимость мощности ИРЧ от положения кристалла по широкой стенке волновода сечением $23 \times 11 \text{ мм}^2$ приведена на рис.5.

Таблица 2

Кристалл	$a \times b$	$\kappa_1 = t/a$	$\kappa_2 = a/\lambda$	λ (мм)	t (мм)	Тип взаимодействия
I	2	3	4	5	6	7
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ $M = 1,50835$	23xII	0,03	0,40	57,5	0,69	oe \rightarrow o
	"-	0,0275	0,45	52,2	0,63	"-
	19x9,5	0,30	0,40	47,5	0,57	"-
	"-	0,0275	0,45	42,2	0,52	"-
	16x8	0,03	0,40	40,0	0,48	"-
	"-	0,025	0,45	35,7	0,44	"-
	11,5,5	0,03	0,40	27,5	0,33	"-
	"-	0,0275	0,45	24,4	0,33	"-
	7,2x3,4	0,03	0,40	18,0	0,20	"-
	"-	0,0275	0,45	16,0	0,20	"-
	3,6x1,8	0,03	0,40	9	0,10	"-
	"-	0,0275	0,45	8	0,10	"-
KH_2PO_4 I,49535	23xII	0,0275	0,45	52,2	0,62	"-
	119x9,5	"-	"-	42,2	0,52	"-
	16x8	"-	"-	35,7	0,44	"-
	11x5,5	"-	"-	24,4	0,30	"-
	7,3x3,4	"-	"-	16,0	0,20	"-
	3,6x1,8	"-	"-	8,0	0,10	"-
	"-	"-	"-	"	"	"
SiO_2 I,53514	23xII	0,193	0,75	30,6	4,40	"-
	"-	0,1	1,4	16,4	2,30	"-
	"-	0,025	5,5	4,4	0,58	"-
	19x9,5	0,193	0,75	25,3	3,7	"-
	"-	0,1	1,4	13,5	1,0	"-

Продолжение таблицы 2

I	2	3	4	5	6	7
	19x9,5	0,025	5,5	3,5	0,48	oe - o
	16x8	0,193	0,75	21,3	3,10	"-
	"-	0,1	1,4	11,4	1,60	"-
	"-	0,025	5,5	2,9	0,40	"-
	11x5,5	0,193	0,75	14,6	2,1	"-
	"-	0,1	1,40	8,0	1,10	"-
	"-	0,025	5,50	2,0	0,28	"-
	7,2x3,4	0,193	0,75	9,6	1,40	"-
	"-	0,1	1,40	5,1	0,70	"-
	"-	0,025	5,50	1,3	0,17	"-
	3,6x1,8	0,193	0,75	4,8	0,70	"-
	"-	0,1	1,40	2,6	0,36	"-
	"-	0,025	5,50	0,65	0,09	"-
Zr TaO ₃	23x11	0,025	0,60	38,3	0,58	"-
2,1685	19x9,5	"-	"-	31,6	0,48	"-
	16x8	"-	"-	26,6	0,40	"-
	11x5,5	"-	"-	18,3	0,28	"-
	7,2x3,4	"-	"-	12,0	0,17	"-
	3,6x1,8	"-	"-	6,0	0,09	"-
Zr NbO ₃	23x11	0,04	0,70	33,0	0,92	ee - e
2,0959	"-	0,025	0,95	24,2	0,56	"-
	19,9,5	0,04	0,70	27,0	0,76	"-
	"-	0,025	0,95	20,0	0,49	"-
	16x8	0,04	0,70	23,0	0,64	"-
	"-	0,025	0,95	16,0	0,40	"-

Продолжение таблицы 2

I	2	3	4	5	6	7
	11x5,5	0,04	0,70	15,7	0,44	ee - e
	"-	0,025	0,95	11,5	0,28	"-
	7,2x3,4	0,04	0,70	10,2	0,29	"-
	"-	0,025	0,95	7,5	0,18	"-
	3,6x1,8	0,04	0,70	5,1	0,14	"-
	"-	0,025	0,95	3,7	0,10	"-

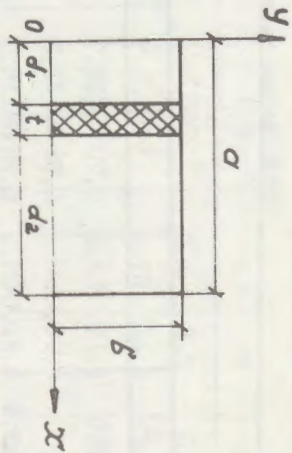


Рис. 1

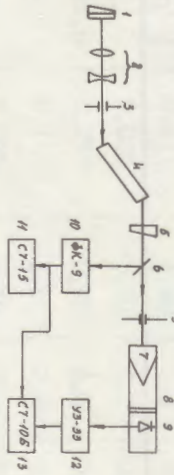


Рис. 2



а

б

Рис. 3

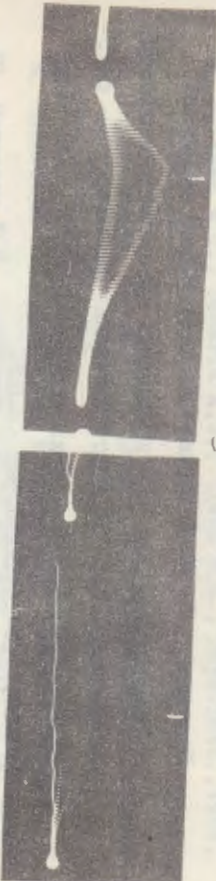
12



а

б

Рис. 4



а

б

Рис. 5

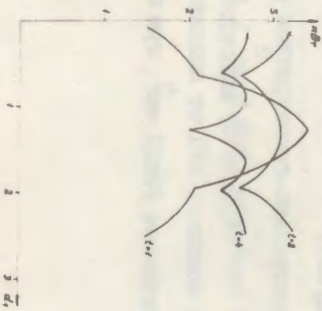


Рис. 6

13

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1 Волновод с диэлектрической пластиной: при $d_2 = d_1$ центрально-симметричное расположение.

Рис.2 Схема экспериментальной установки, 1- 100 % зеркало в контакте с киветой красителя 3955 в нитробензоле толщиной 200 мкм; 2- телескоп с увеличением 2:1; 3- диафрагма $\phi = 2$ мм для подавления высших поперечных мод; 4- активный элемент, торцы которого срезаны под углом Брюстера; 5- 50 % зеркало на клиновидной подложке; 6- делитель пучка; 7- нелинейный кристалл в волноводе; 8- фильтр СВЧ; 9- кристаллический детектор; 10- фотоприемник ФК-9; 11- осциллограф С7-15; 12- усилитель УЗ-33; 13- осциллограф С7-10Б.

Рис.3 Осциллограммы цугов ИК(а) и ИРЧ(б) при несимметричном ($d_1 \neq 0$) расположении кристалла в волноводе сечением $7,2 \times 3,4$ мм² (развертка 10 нс/мм).

Рис.4 То же при центрально-симметричном расположении (развертка $4\sigma - 5$ нс/мм).

Рис.5 То же при центрально-симметричном расположении кристалла в волноводе сечением $19 \times 9,5$ мм² (развертка 10 нс/мм).

Рис.6 Зависимость мощности ИРЧ от положения (d_1) кристалла в волноводе сечением 23×10 мм² при $t = 1$ мм, 2 мм, 4 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paris S.M., Appl.Phys.Lett., 1980, vol.36, N.12.
2. Auston D.H., Appl.Phys.Lett., 1975, vol.26, p.101.
3. Zernike F., Phys.Rev.Lett., 1969, vol.22, N.18.
4. Shen J.R., Jang K.H., Appl.Phys.Lett., 1971, vol.19, N.9.
5. Jajima T., Takeuchi N., Jap.J.Appl.Phys., 1970, vol.9, p.1361.
6. Аветисян Ю.О., Мартirosян Р.М., Мирзабекян Э.Г., П.С.Погосян, Квантовая электроника, 1978, т.5, № 5.
7. Brienza M.J., Demaria A.J., Glenn W.H., Phys.Lett., 1968, vol.26A, N.8.
8. В.И.Богатик, Лобов Г.Д., Штыков В.Б. Квантовая электроника, 1973, т.17, № 5.
9. Никогосян А.С. Квантовая электроника, 1988, т.15, № 5.
10. Поплавко Ю.М., Мерзакри В.В. и др. ФТТ, 1973, т.15, № 5.
11. Бергер М.Н., Капилевич Б. Прямоугольные волноводы с диэлектриками, 1973.
12. Hobden M.V., Warner J., Phys.Lett., 1966, vol.22, p.243.

Рукопись поступила 22 января 199

Э.М.ЛАЗИЕВ, А.С.НИКОГОСЯН

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УКИ СВЕТА В СВЧ ДИАПАЗОН В
ВОЛНОВОДЕ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОМ НЕЛИНЕЙНЫМ КРИСТАЛЛОМ

Редактор Л.П.Мукаян

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 3/УШ-90г. ВД_04223 Формат 60x4/16

Офсетная Печать. Уч. изд. л. 0,8 Тираж 299 экз. Ц. 10 к.

Зак. тип. № 191

Индекс 3649

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул. Братьев Алиханян 2.