

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМ. Л.В.КИРЕНСКОГО

С О А Н С С С Р

Препринт ИФСО-66Ф

В.Г.Архипкин, А.К.Попов, В.П.Тимофеев

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМЫЙ И УФ
ДИАПАЗОНЫ В ГАЗООБРАЗНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ
РЕЗОНАНСНЫХ ЧЕТЫРЕХОТОННЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Красноярск 1977

Впервые получено преобразование ИК излучения гелий-неонового лазера с $\lambda = 3,39 \mu\text{м}$ в УФ область $330,5 \text{ нм}$ в парах натрия. Использовался двухфотонный резонанс излучения лазера на красителе родамин В $\lambda = 602,4 \text{ нм}$ с запрещенным переходом $3S - 5S$ атома натрия и близость частоты генерируемого излучения к резонансу с разрешенным переходом $3s^2S_{1/2} - 4p^2P_{1/2}^o$.

Впервые получено преобразование ИК излучения неодимового лазера на гранате с $\lambda = 1,06 \mu\text{м}$ в видимую область 420 нм в парах рубидия. Использовался двухфотонный резонанс излучения лазера на красителе родамин В $\lambda = 604 \text{ нм}$ и $\lambda = 602 \text{ нм}$ с высокими уровнями атома рубидия $15d$ и $16d$ соответственно. При этом также использовался квазирезонанс генерируемого излучения с разрешенными переходами $5s^2S_{1/2} - 6p^2P_{1/2}^o$ и $5s^2S_{1/2} - 6p^2P_{3/2}^o$.

Ответственные за выпуск -

Н.Н.Дубина
В.Г.Архипкин

© Институт физики СО АН СССР, Красноярск, 1977г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
§1. Некоторые перспективные идеи и схемы для апконверсии ИК излучения.	4
§2. Преобразование излучения гелий-неонового лазера с $\lambda = 3,39 \mu\text{м}$ в область $330,5 \text{ нм}$ в парах натрия.	6
§3. Преобразование излучения неодимового лазера на гранате с $\lambda = 1,06 \mu\text{м}$ в область 420 нм в парах рубидия.	9
Литература	20

В в е д е н и е

Проблема преобразования частоты ИК излучения в область высокой чувствительности и малой инерционности фотоприемников имеет большое практическое и теоретическое значение. Она решается как с помощью нелинейной оптики кристаллов так и нелинейной оптики газов и паров металлов. Широкие диапазоны прозрачности, возможность плавного изменения концентрации атомов нелинейной среды и условий фазового согласования взаимодействующих волн, выбора больших апертур и длин среды, а также полное восстановление среды в случае электрического пробоя дает ряд преимуществ последнему методу.

§ I. Н е к о т о р ы е п е р с п е к т и в н ы е с р е д ы и с х е м ы д л я а п к о н - в е р с и И К и з л у ч е н и я.

В работах [1-3] была разработана методика поиска перспективных нелинейных газообразных сред для целей преобразования ИК излучения в видимую и УФ области спектра и выяснения оптимальных условий для преобразования излучения в этих средах. Для эффективного преобразования целесообразно выбирать либо низколежачие переходы с большими силами осцилляторов (при этом можно допускать значительную нерезонансность по частоте преобразованного излучения), либо использовать двухфотонные резонансы накачки и однофотонные резонансы генерируемого излучения с высоколежащими уровнями.

Плотность таких уровней обычно велика, поэтому условия выбора резонансных схем облегчается. За счет резонансов можно скомпенсировать слабость дипольных моментов переходов из вы-

соколежачих состояний в основное. Базовый синхронизм взаимодействующих волн предпочтительно осуществлять без использования синхронизирующей примеси, так как последняя приводит к уширению резонансных переходов. Этого можно достигнуть либо за счет перестройки частот излучения накачки (например, в случае атомов щелочных металлов частоту накачки можно выбирать внутри резонансного дублета), либо за счет выбора определенной отстройки частоты генерируемого излучения от одного из разрешенных переходов. Оказалось, также, что эффективность преобразования возрастает, если выходить из двухфотонного резонанса с одновременным увеличением интенсивностей накачек вплоть до интенсивностей однофотонного насыщения.

На основании этих выводов был произведен поиск нелинейных атомных сред для преобразования ИК излучения в видимый или ближний УФ диапазоны. Для указанной цели оказались перспективными пары некоторых щелочных металлов как с точки зрения расположения энергетических уровней атомов, так и с точки зрения получения и поддержания необходимой концентрации паров. Другие элементы, такие как щелочноземельные, элементы группы ZnI , CdI , HgI и элементы с достраивающейся p -оболочкой также можно использовать для преобразования ИК излучения. Но из-за большой энергии возбуждения их атомных состояний преобразование осуществляется в далекой УФ или в вакуумно-ультрафиолетовой области спектра. К тому же у большинства из этих элементов велика температура, необходимая для достижения достаточной концентрации паров [4], что затрудняет их использование.

В таблице I приведены наиболее перспективные среды для эффективного преобразования ИК излучения наиболее распространенных лазеров таких как неодимовый, гелий-неоновый и лазер на CO_2 [5]

Анализ показал, что для указанных сред могут быть достигнуты квантовые коэффициенты преобразования ИК излучения порядка 0,5. Во второй колонке отражены уровни, с которыми должен осуществляться двухфотонный квазирезонанс или резонанс. В двух следующих помещены длины волн излучения накачки. В пятой - длины волн преобразуемого излучения и в двух последних - длины волн генерируемого излучения с указанием используемого процесса.

Для проверки возможности и условий преобразования ИК излучения в найденных средах было выполнено два эксперимента, которые рассмотрены ниже.

§2. Преобразование излучения гелий-неонового лазера с $\lambda = 3,39 \mu\text{м}$ в область $330,5 \mu\text{м}$ в парах натрия.

К настоящему времени известны лишь две экспериментальные работы по апконверсии ИК излучения в газообразных средах. Так, авторы [6] успешно преобразовали излучение CO_2 лазера в ближний УФ диапазон. В работе [7] было осуществлено преобразование излучения из диапазона $2,9 \mu\text{м}$ в область $455,8 \mu\text{м}$ в парах цезия. В качестве источника излучения $2,9 \mu\text{м}$ использовался импульсный параметрический генератор на кристалле LiNbO_3 . Ряд схем преобразования излучения из диапазонов $1,06 \mu\text{м}$, $3,39 \mu\text{м}$, $10,6 \mu\text{м}$ в видимый и ближний УФ диапазоны были предложены в работах [2, 5, 8, 9].

Ниже описывается эксперимент, в котором впервые получено преобразование слабого ИК излучения непрерывного гелий-неонового лазера в область $330,5 \mu\text{м}$ в кубической нелинейной газообразной сре-

де - парах натрия.

Помимо иллюстрации широких возможностей апконверсии ИК излучения в кубических нелинейных газообразных средах для цели спектроскопии, данная задача представляет интерес еще и с точки зрения измерения частот излучения в оптическом диапазоне, поскольку эта частота излучения гелий-неонового лазера в настоящее время может быть измерена с высокой точностью.

Для преобразования использовался сильный двухфотонный переход атома натрия $3S - 5S$ (рис.1.). При этом генерируемая частота $\nu_3 = 2\nu_1 - \nu_2$ оказывается близкой к частоте разрешенного перехода $3S - 4P$. В качестве накачки с частотой ν_1 , резонансной двухфотонному переходу, использовано излучение лазера на красителе родамин В с $\lambda = 602,4 \text{ нм}$. Мощность излучения на указанной длине волны была 5 кВт , ширина линии генерации 2 см^{-1} . Мощность излучения гелий-неонового лазера перед входом в квету с парами натрия была порядка 1 мВт .

Схема эксперимента представлена на рис.2. Излучение неодимового лазера на гранате на частоте второй гармоники служит накачкой лазера на красителе. С помощью полупрозрачной пластинки осуществлялось смещение излучения гелий-неонового лазера с излучением лазера на красителе. Оба излучения вводятся в металлическую нагреваемую квету с парами натрия и гелия. Гелий не оказывает влияние на процессы преобразования, а лишь препятствует конденсации паров натрия на окна кветы. Конденсация паров происходила на сетке из нержавеющей стали, помещенной вдоль стенок кветы. Сетка играет роль фитиля, возвращающего жидкий конденсат в зону нагрева. Фокусирующие системы служили для точного согласования волновых фронтов взаимодействующих пучков. Выделение преобразованного излучения производилось двойным мо-

нохроматором ДМР-4, а его регистрация - электронным умножителем И4ЭЛУ-ФС и осциллографом СИ-31. Длина активной среды в кивете была около 4см.

На рис.3 показана кривая зависимости относительной амплитуды генерируемого сигнала от температуры киветы с парами натрия. Пик сигнала наблюдался при температуре 425°C, что соответствует концентрации паров 10^{16} см^{-3} и давлению 0,7 тора. Необходимо отметить, что этот сигнал измерялся как разность двух показаний осциллографа в присутствии излучения гелий-неонового лазера и в его отсутствие. Наличие сигнала в отсутствие излучения с $\lambda = 3,39 \mu\text{м}$ объясняется распадом возбужденного уровня 5S через никелеватые состояния, одним из каналов которого является переход $4p - 3s$, а частоты спонтанной люминесценции на этом переходе всего на несколько обратных сантиметров отличаются от частоты сигнала параметрической генерации.

Оценка показывает, что эффективность преобразования составляет величину порядка $10^{-5} - 10^{-4}$. В этом эксперименте не применялось специальных мер для точного согласования конфокальных параметров пучков, сужения ширины линии и увеличения мощности накачки лазера на красителе. Как показывает расчеты (таблица 2), проведенные в приближении заданного поля накачки с гауссовой формой пучка по сечению [1], оптимизация этих параметров позволит увеличить коэффициент преобразования до нескольких десятков процентов. Для этого необходимо взять из двухфотонного резонанса на величину порядка 18 см^{-1} , что позволит, во-первых, увеличить интенсивности накачки, а во-вторых, выполнить условия фазового согласования при больших давлениях.

В таблице 2 введены следующие обозначения: $\chi^{(3)}$ - нелинейная атомная кубическая восприимчивость;

$\sigma^{(1)}(\nu_1)$ - сечение однофотонного, а $\sigma^{(2)}(\nu_2)$ - двухфотонного поглощения накачки; $(W_1/A_1)_s^{(1)}$ - значение интенсивности, при которой происходит однофотонное насыщение, а $(W_1/A_1)_s^{(2)}$ - двухфотонного, где W_1 - мощность накачки, а A_1 - эффективная площадь гауссова пучка; N - концентрация атомов, а L - длина нелинейной среды. В предположении, что допустимо поглощение половины мощности излучения накачки, вычислены допустимые значения произведения $(NL)_1$ для однофотонного поглощения и $(NL)_2$ - для двухфотонного. Величины $(NL)_q$ и $(W_1/A_1)_q$ соответствуют тем значениям произведения NL и значениям интенсивности накачки W_1/A_1 , при которых можно достичь квантового коэффициента преобразования $\eta_q = 50\%$. Это равносильно коэффициенту преобразования по мощности $\eta_p = 513\%$. Отметим также, что расчеты выполнены для случая слабой фокусировки.

Как видно из таблицы 2, для достижения 50%-го преобразования необходимо иметь сравнительно невысокие интенсивности накачки и высокие концентрации паров атомов натрия. Последнее, в свою очередь, потребует высокой степени фазового синхронизма на длине нелинейной среды, для чего необходимо сузить ширину линии излучения накачки до величины порядка $0,1 \text{ см}^{-1}$.

§3. Преобразование излучения неодимового лазера на гранате с $\lambda = 1,06 \mu\text{м}$ в область 420нм в парах рубидия.

Перейдем к изложению эксперимента, в котором впервые получено преобразование ИК излучения неодимового лазера на гранате в видимую область 420нм в парах рубидия. В качестве на-

качки использовалось излучение лазера на красителе родамин В с $\lambda = 604$ нм мощностью 5 вт перед входом в кювету и с шириной линии генерации 2 см^{-1} , частота которого совпадала с частотой двухфотонного перехода $5S - 15d$ (рис. 4) и излучение того же красителя с $\lambda = 602$ нм, резонансное двухфотонному переходу $5S - 16d$. В этом случае для преобразования использовались высоколежачие состояния атома рубидия. Они были выбраны исходя из того, что частоты переходов $6p^2P_{1/2}^0 - 15d$ и $6p^2P_{3/2}^0 - 16d$ близки к частоте излучения неодимового лазера. Таким образом, данная схема преобразования соответствует второму случаю, обсуждаемому в §1.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. Излучение неодимового лазера ЛТИПЧ-5 удваивалось, затем излучение первой и второй гармоник разводилось призмой. Далее излучение на частоте второй гармоники служило накачкой лазера на красителе. Излучение этого лазера смешивалось с излучением первой гармоники неодимового лазера с помощью полупрозрачной пластинки и поступало в кювету с парами рубидия. Кювета представляла собой отпаянный цилиндр из пирекса длиной 5 см с небольшим количеством рубидия, помещаемый в нагреваемую печь из асбестовой плитки с прозрачными окнами. Фокусирующие системы служили для частичного согласования фазовых фронтов взаимодействующих волн. Сигнал генерации выделялся двойным монохроматором ДМР-4 и поступал на электронный умножитель И43ЛУ-ЭС. Регистрация сигнала производилась осциллографом СИ-31.

В эксперименте исследовалась зависимость амплитуды сигнала на частоте $\nu_3 = 2\nu_1 - \nu_2$ от давления паров рубидия для каждой из систем резонансных переходов $5S - 15d - 6p^2P_{1/2}^0 - 5S$ и $5S - 16d - 6p^2P_{3/2}^0 - 5S$. На рис. 6 приведена кривая зависимости сигнала ге-

нерации от температуры кюветы при использовании двухфотонного перехода $5S - 16d$. Пик сигнала наблюдался при температуре 325°C , что соответствовало концентрации паров рубидия $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и давлению 2 тора. Мощность генерируемого излучения составляла несколько милливольт. Оценка показывает, что коэффициент преобразования может составлять несколько десятков процентов при сужении ширины линии накачки до величины $\Delta\nu < 0,1 \text{ см}^{-1}$ и увеличении ее интенсивности до величины порядка $10^8 - 10^9 \text{ вт/см}^2$.

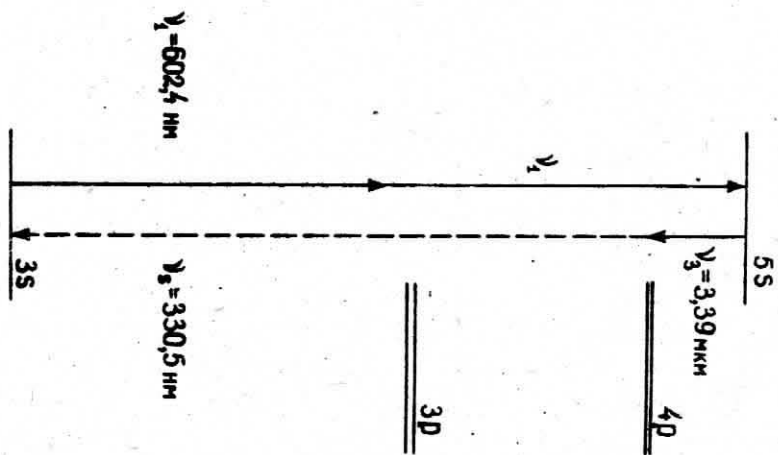
ТАБЛИЦА 1. Некоторые перспективные среды и схемы апконверсии ИК излучения.

Длины волн на- мачки и гене- рации (мкм)		λ_1	λ_2	λ_3	λ_s ($\nu_s = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3$)	λ_s ($\nu_s = \nu_1 + \nu_2 - \nu_3$)
Нелинейные среды						
Na	5 s	0,6	0,6	3,39	-	0,33
	5 s	0,59	0,616	3,39	-	0,33
	3 d	0,68	0,68	1,06	0,26	-
K	8 d	0,6	0,6	10,6	-	0,31
	8 d	"	"	10,23	0,3	"
	10 s	"	"	10,6	"	0,31
	9 s	0,61	0,61	9,26	0,3	-
Rb	15 d	0,6	0,6	1,06	-	0,421
	16 d	"	"	1,06	-	0,420
	5 d	0,795	0,790	10,6+1,06	0,37+0,28	0,4+0,61
Cs	7 s	1,06	1,06	3,39	0,46	-
	7 d	1,06	0,57	3,39	0,33	-
	7 s	0,88	1,39	10,6+1,06	0,51+0,36	0,37+1,1
	6 d	0,88	0,88	10,6	-	0,46
	6 d	0,88	0,88	9,6	-	0,46
	5 d	1,38	1,38	1,38	0,46	-
	5 d	1,37	1,37	1,37	0,46	-
7 s	1,084	1,084	1,084	0,36	-	
Tl	7 p	0,57	0,57	1,06	0,23	0,39
	"	"	"	1,15	-	0,38
	"	"	"	10,6	0,28	-

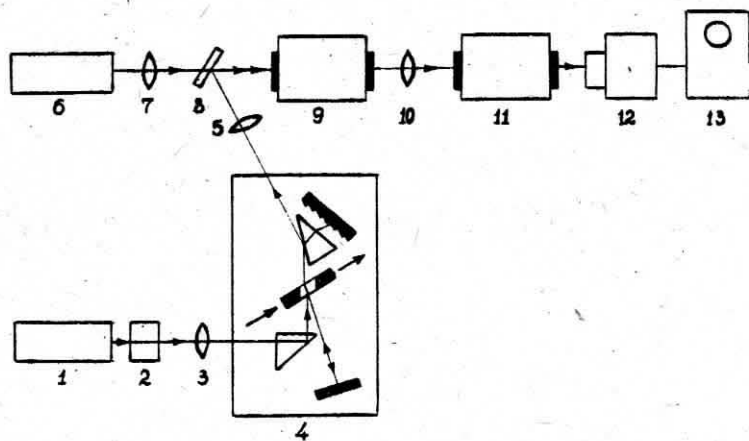
ТАБЛИЦА 2. Условия апконверсии ИК излучения с $\lambda = 3,39 \mu\text{м}$ в УФ область в парах натрия с $\eta_q = 50\%$.

λ_1	, нм	602,0
λ_s	, нм	330,3
$\alpha^{(3)}$, ст/см	$5,8 \cdot 10^{-27}$
$\sigma^{(1)}(\nu_1)$, см ²	$5,5 \cdot 10^{-36} N$
$\sigma^{(2)}(\nu_1)$, см ²	$1,0 \cdot 10^{-31} (W_1/A_1)$
$(W_1/A_1)_s^{(1)}$, Вт/см ²	$3,1 \cdot 10^{24} I/N$
$(W_1/A_1)_s^{(2)}$, Вт/см ²	$1,5 \cdot 10^{10}$
$(NL)_1$, см ⁻²	$1,0 \cdot 10^{18}$
$(NL)_2$, см ⁻²	$4,5 \cdot 10^{20}$
$(NL)_q$, см ⁻²	$1,0 \cdot 10^{18}$
L	, см	8
N	, см ⁻³	$1,3 \cdot 10^{17}$
$(W_1/A_1)_q$, Вт/см ²	$1,0 \cdot 10^6$
η_q	, %	50
η_p	, %	513

Рис.1. Схема энергетических уровней атома натрия, дающих основной вклад в процесс преобразования.



- 14 -



- 15 -

Рис.2. Схема экспериментальной установки для преобразования частоты гелий-неонового лазера с $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ в ближнюю УФ область. 1- неодимовый лазер на АИГ; 2- кристалл LiNbO_3 ; 3, 5, 7, 10-фокусирующие системы; 4- лазер на красителе родамин В; 6- гелий-неоновый лазер; 8- полупрозрачная пластинка; 9- кювета с парами натрия; 11- монохроматор ДМР-4; 12- фотоумножитель 14ЭЛУ-ФС; 13- осциллограф С1-31.

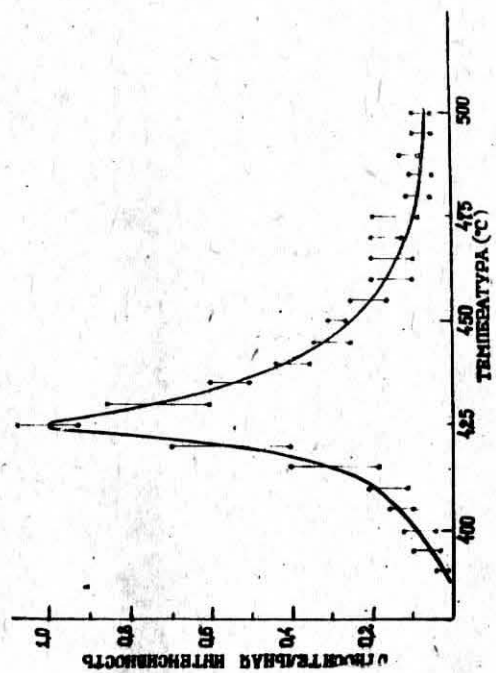


Рис.3. Графиче зависимость от носительной амплитуды сигнала генерации с $\lambda = 330,5$ мкм от температуры кванты с парами натрия.

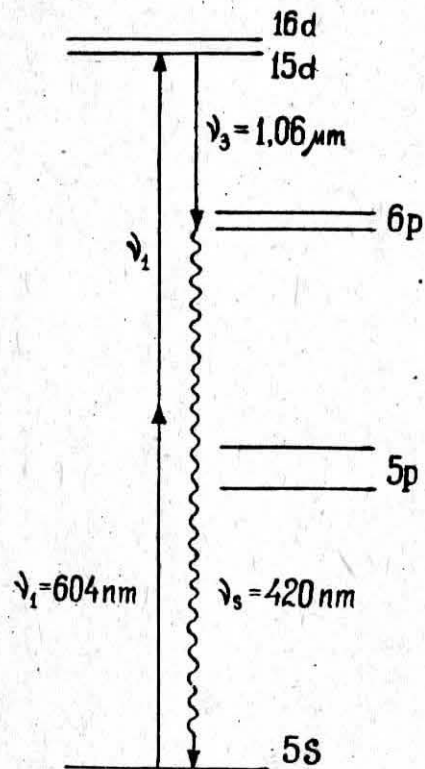


Рис.4. Схема энергетических уровней атома рубидия, дающих основной вклад в процесс преобразования

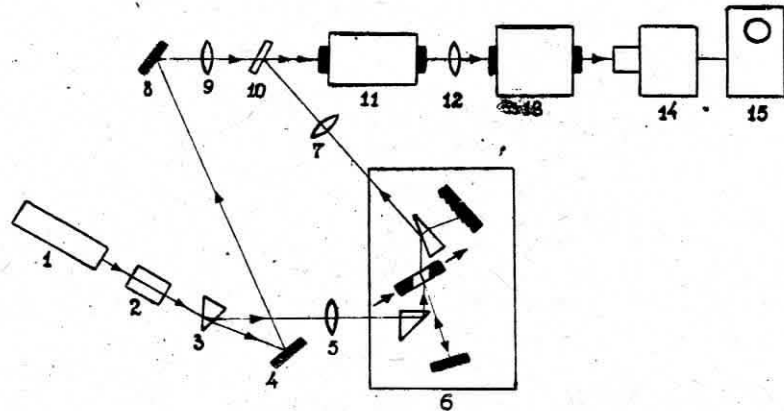


Рис.5. Схема экспериментальной установки для преобразования частоты неодимового лазера с $\lambda = 1,06 \mu\text{м}$ в видимую область 420 нм . 1- неодимовый лазер на АИГ; 2- кристаллы LiNbO_3 ; 3- разводящая призма; 4, 8- отражающие зеркала; 5, 7, 9, 12- фокусирующие системы; 6- лазер на красителе родамин В; 10- полупрозрачная пластинка; 11- кювета с парами рубидия; 13- монохроматор ДМР-4; 14- фотоумножитель ИЭДУ-ФС; 15- осциллограф СИ-31.

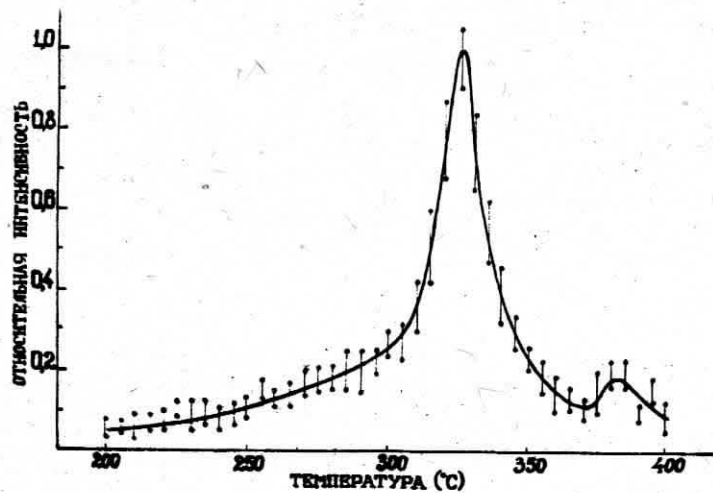


Рис.6. График зависимости относительной амплитуды сигнала генерации с $\lambda = 420 \text{ нм}$ от температуры кюветы с парами рубидия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miles R.B., Harris S.E. *Optical Third-Harmonic Generation in Alkali Metal Vapors.*, IEEE J. Quant. Electr. "1973, vol. QE-9, №4, p.470-484.
2. Попов А.К., Тимофеев В.П. Условия эффективного преобразования частоты излучения на основе резонансных нелинейных процессов в газах и парах металлов. Препринт ИССО-503, Красноярск, 1976, 66с.
3. Popov A.K., Timofeev V.P. *Up-conversion With Resonantly Two-Photon Pumped Atomic Nonlinear Media.* - "Optics communications" 1977, vol 20, №1, p.94-100.
4. Коваленко В.Ф. Скорость испарения и давления пара химических элементов, - "Электронная техника. I. Электроника СВЧ", 1969, №10, с.119-145.
5. Тимофеев В.П., Архипкин В.Г., Мелкозерова Л.В., Попов А.К. Апконверсия частот излучения из области $\sim 10,6$ мкм; $3,39$ мкм и $1,06$ мкм в видимый и УФ диапазоны в парах щелочных металлов. - Тезисы докладов на Совещании по нелинейным резонансным преобразованиям частоты лазерного излучения. Красноярск, 1977, с.32.
6. Bloom D.M., Yardley J.T., Young J.F. Harris S.E. *Infrared Up-conversion With Resonantly Two-Photon Pumped Metal Vapors.* - "Appl. Phys. Lett." 1974, vol. 24, №9, p.427-428.

7. Stappaerts E.A., Harris S.E., Young J.F. *Efficient IR Image Up-conversion in Two-Photon Resonantly Pumped Cs Vapors.* "Appl. Phys. Lett." 1976, vol. 29, №10, p.669-670.
8. Попов А.К., Тимофеев В.П. Условия преобразования излучения He-Ne лазера с $\lambda=3,39$ мкм в видимую область в парах атомарного цезия. Оптика и спектроскопия, 1977, т.43, № , с.962-965.
9. Попов А.К., Тимофеев В.П. Условия преобразования частоты излучения CO₂ лазера в видимую область при сменении с излучением лазера на красители в парах цезия. ИЖО, 1977, т.27, № , с.804-807.

Результаты будут опубликованы

1. Живина ИЭТФ, 27, в.2, декабрь 1978г.
2. Живина ИЭТФ, январь 1978г.
3. "Appl. Phys.", начало 1978г.
4. "Optics соийтин." начало 1978г.

АЛО8232 Подписано к печати 15.12.77
Объем I п.л Тираж 200 экз. Заказ 500
ИФСО, Красноярск, 36, Академгородок