

Космический



**В. И. Держиев, К. Р. Чикин, А. В. Карелин,
В. В. Харитонов, С. И. Яковленко**

065-87

*П
10-62
ЖБ 3249
МФН*

**ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ НАКАЧКИ ГЕЛИЙ-КАДМИЕВОГО
ЛАЗЕРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

МОСКВА 1987

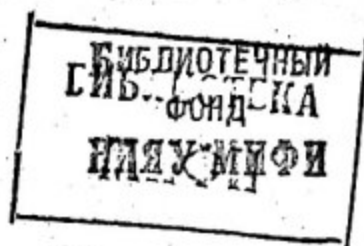
Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Московский ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-физический институт

В.И. Держижев, К.Р. Чикин, А.В. Карелин,
В.В. Харитонов, С.И. Яковленко

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ НАКАЧКИ ГЕЛИЙ-КАДМИЕВОГО
ЛАЗЕРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Препринт 065-87



Утверждено
редсоветом института

Москва 1987

УДК 621.039, 621.373

Держиев В.И., Чикин К.Р., Карелин А.В., Харитонов В.В., Яковленко С.И. Оптимальные условия накачки гелий-кадмиевого лазера высокого давления. - М.: Препринт/МИФИ, 065-87, 1987.-20 с.

Рассчитаны характеристики стационарной генерации ($\lambda = 441,6$ нм) He - Cd лазера высокого давления ($P \geq 1$ атм), накачиваемого жестким ионизатором. При оптимальных параметрах He - Cd смеси ($[He] \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $[Cd] \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и энергозатрате $W \sim 100 \text{ Вт/см}^3$ КПД генерации (по вложенной энергии) не превышает $0,4 \div 0,6 \%$, а величина коэффициента усиления составляет $\sim 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. При прокачке газа через лазерную кювету продольный градиент температуры $> 300 \text{ К/м}$ слабо влияет на коэффициент усиления.

© Московский инженерно-физический институт, 1987 г.

Введение

Гелий-кадмиевый лазер видимого диапазона ($\lambda = 441,6;$ 533,7; 537,8 нм) представляет определенный интерес в ряде приложений ввиду удобного спектрального диапазона генерации, а также невысоких пороговых характеристик накачки ($W \sim 10$ Вт/см³). К тому же необходимая плотность паров кадмия ($\sim 10^{16}$ см⁻³) достигается при сравнительно низких температурах газа ($\sim 500^\circ\text{C}$).

Квазинепрерывная генерация на переходе $\lambda = 441,6$ нм иона Cd II была получена сравнительно давно [1] (более подробную историческую справку см. в [2]).

М.ФИ принадлежит приоритет в создании плазменного лазера на смеси гелия с парами кадмия, работавшего на длинах волн 533,7; 537,8 и 441,6 нм в режиме коротких единичных импульсов длительностью около 0,2 мс при накачке заряженными продуктами реакции $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ [3,4]. Для повышения удельных характеристик генерации перспективен переход к высоким давлениям буферного газа ($P \gg 1$ атм) и большим длительностям импульсов накачки. При этом обычно возникают две трудности. С повышением длительности накачки даже при невысоких энерговкладах возможен перегрев газа (см., например, [5,6]). При этом для охлаждения необходимо организовать прокачку активной среды. Повышение давления буферного газа может в некоторых случаях ухудшать равномерность энерговыделения в объеме лазерной кюветы и ухудшать генерационные характеристики лазера.

В настоящей работе проведены расчеты генерационных характеристик гелий-кадмиевого лазера высокого давления, накачиваемого жестким ионизатором. Анализ выполнялся на комплексе программ "Плазер" с набором констант, приведенных в [2]. Рассматривалась накачка длинными импульсами ($\tau \gg 1$ с) и мощностью $W \sim 50 + 200$ Вт/см³. При этих параметрах накачки генерация осуществляется в квазистационарных по N_e, T_e параметрах плазмы. Оптимальные концентрации $[\text{He}] \sim 10^{19}$ см⁻³, $[\text{Cd}] \sim 10^{16}$ см⁻³ сравнительно слабо зависят от температуры газа, добротности резонатора и мощности накачки. При накачке $W \sim 100$ Вт/см³ в оптимальных условиях ненасыщенный коэффициент усиления ($\lambda = 441,6$ нм) составляет $\sim 10^{-2}$ см⁻¹, а КПД генерации по вложенной энергии $\sim 0,4 + 0,6$ %. При мощности $W = 50$ Вт/см³ и ограничении продольного (вдоль кюветы) градиента температуры

величиной 300 К/м необходимая скорость прокачки смеси составляет ~ 500 м/с. При этом ненасыщенный коэффициент усиления слабо меняется ($\sim 20\%$) вдоль лазерной кюветы.

1. Плазмохимическая модель He - Cd-лазера

В настоящей работе рассмотрена модель формирования инверсной населенности на ионе Cd II, генерирующем излучение с длиной волны 441,6 нм на переходах $4d^9 5s^2 \ ^2D_{5/2} - 4d^{10} 5p \ ^2P_{3/2}$. Схема термов приведена на рис.1.

Воздействие быстрых заряженных частиц на газ будем характеризовать следующими параметрами: частотой ионизации ν_i (I/c), частотой возбуждения $\nu_e = 0,4 \nu_i$ и энергией, затрачиваемой на образование пары ион - электрон $E_{\text{пар}} = 46$ эв. Число атомов, ионизуемых в единице объема в единицу времени (энергонапряженность среды), определяется соотношением

$$W = E_{\text{пар}} \nu_i N, \quad (I)$$

где N (см^{-3}) - плотность буферного газа (гелия).

Под воздействием высокоэнергетичных заряженных частиц образуется низкотемпературная плазма, включающая атомы, ионы и молекулы как в основном, так и в возбужденном состоянии: He^+ , He^x , He_2^+ , Cd^+ , Cd^x , Cd_2^+ , Cd_2^x , Cd_3^+ . Передача возбуждения иону кадмия осуществляется в реакциях столкновения с He^+ , He^x и He_2^+ (см. таблицу).

Верхний лазерный уровень $4d^9 5s^2 \ ^2D_{5/2}$ заселяется в реакциях ионизации Пеннинга и в реакциях перезарядки с возбуждением. Распад уровня осуществляется за счет девозбуждения электронным ударом, образования молекулярных ионов Cd_2^+ при тройных соударениях и спонтанного излучения. Заселение нижнего лазерного уровня $4d^{10} 5p \ ^2P_{3/2}$ осуществляется за счет радиационного распада с верхних уровней, ионизации Пеннинга, перезарядки с возбуждением и релаксации вниз по возбужденным состояниям нормальных $4d^{10} n \ell m$ уровней. Распадается нижний уровень радиационно.

Накачка гелий-кадмиевого лазера, главным образом, идет за счет ионизации Пеннинга и перезарядки на ионе He_2^+ (см. реакцию 2 в таблице). Избыток энергии переходит в энергию электрона. При этом сечение возбуждения состояния D примерно в три раза

больше, чем для состояния Р.

Величина ненасыщенного коэффициента усиления \mathfrak{K} определяется заселенностью рабочих уровней и характеристиками рабочего перехода излучающей системы

$$\mathfrak{K} = \sigma_{af}^{\Phi} \Delta N, \quad \sigma_{af}^{\Phi} = \frac{\lambda A_{af}}{4 \Delta \omega}, \quad (2)$$

где σ_{af}^{Φ} - сечение индуцированного перехода, $\lambda = 2\pi c/\omega$ - длина волны усиливаемого излучения, A_{af} - скорость спонтанного перехода (s^{-1}), ΔN - плотность активных атомов, $\Delta \omega$ - ударная ширина линии (s^{-1}).

Ударная ширина линии линейно зависит от концентрации буферного газа. Как показано в [2], с увеличением давления буферного газа $\approx 2 + 3$ атм столкновительное уширение лазерной линии приводит к уменьшению сечения индуцированного перехода и коэффициента усиления \mathfrak{K} до порогового значения, определяющего срыв генерации. Величина порогового коэффициента усиления определяется [6]

$$\mathfrak{K}_{\text{пор}} = |\ln(1-T)|/L \approx T/L \quad (T \ll 1), \quad (3)$$

где L - длина активной среды, T - коэффициент пропускания зеркал.

2. Оптимизация состава He - Cd - лазера

Возможности He - Cd-лазера ($\lambda = 441,6$ нм) с рекомбинационно-неравновесной плотной плазмой рассмотрены на основе численного анализа подробной кинетической модели, включающей свыше 40 плазмохимических реакций и 13 возбужденных состояний иона $Cd II$ [2].

Расчеты показывают, что с увеличением мощности накачки коэффициент усиления среды почти линейно возрастает (рис. 2). Так, при мощности накачки $W = 500$ Вт/см³ и плотности гелия $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³, что соответствует частоте ионизации ~ 7 I/c, максимальный коэффициент усиления в среде не превышает $1,6 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹. При уменьшении частоты ионизации до 0,1 I/c коэффициент становится ниже порогового значения $\mathfrak{K}_{\text{пор}} =$

$\approx 3,0 \cdot 10^{-4}$ I/см, при котором еще возможна генерация.

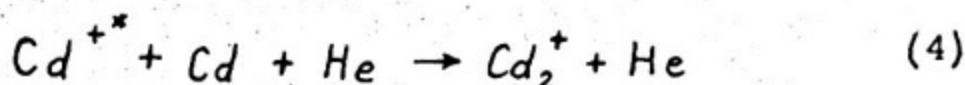
Вследствие низкого коэффициента усиления $\sim 10^{-3} + 10^{-2}$ I/см оптимум по резонатору смещается в область глухих зеркал. Как следует из рис. 3, максимальный КПД лазера наблюдается при коэффициенте пропускания выходного зеркала $T \sim 10\%$. Второе зеркало резонатора полагалось глухим. С увеличением пропускания T резонатора рост выходной мощности из-за увеличения пропускания выходного зеркала компенсируется возрастанием внутрирезонаторных потерь.

Как следует из рис. 4, увеличение температуры среды приводит к слабому уменьшению выходной мощности излучения, то есть He - Cd смесь допускает большие перегревы среды. Так, повышение температуры среды от 700 до 1200 K приводит к падению выходной мощности лазера на 20% (без учета оптических эффектов в лазерном канале). При этом полагалось, что весь кадмий в лазерной кювете испарен и его концентрация с ростом температуры не меняется.

Результаты расчетов выходной мощности He - Cd лазера как функции концентрации атомов гелия и кадмия, температуры смеси приведены на рис. 5. Расчеты показали существование глобального экстремума выходной мощности лазера при оптимальной плотности гелия $\sim 10^{19}$ см⁻³ и кадмия $\sim 10^{16}$ см⁻³ (рис. 5а). Если давление паров кадмия определяется температурой смеси (вариант без прокачки), то оптимальная плотность гелия составляет $\sim 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ а оптимальная температура 360°С (что соответствует $[Cd] \sim 0,6 \cdot 10^{16}$ см⁻³). Пик мощности в этих координатах достаточно острый (рис. 5б). При концентрациях гелия $[He] = 7 \cdot 10^{18} + 4 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и кадмия $[Cd] = 3 \cdot 10^{15} + 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ выходная мощность лазера становится не ниже 20% от пикового значения. Изменение мощности накачки, длины резонатора, коэффициента пропускания зеркал практически не влияют на положение максимума мощности, а лишь изменяют его величину.

Происхождение максимума выходной мощности имеет следующее объяснение. С ростом концентрации гелия растет накачка на верхнее рабочее состояние лазерного перехода вследствие интенсивного образования ионов He_2^+ . Одновременно происходит столкновительное уширение линии, приводящее к падению сечения индуцированного перехода, и увод ионов Cd^{+*} в молекулярный ион Cd_2^+ в

реакции



Конкуренция этих процессов и приводит к наличию максимума зависимости выходной мощности излучения от концентрации гелия. С ростом температуры среды растет концентрация атомов кадмия и, соответственно, растет накачка на верхнее рабочее состояние. Однако конкурирующий процесс (4) приводит к тому, что при $[Cd] > 10^{16} \text{ см}^{-3}$ происходит резкое падение выходной мощности, вплоть до срыва генерации при температуре среды $T = 430 \div 450^\circ \text{C}$.

3. Влияние неравномерности энерговыделения в газовой среде на коэффициент усиления лазера

Энерговыделение в газе неравномерно как по длине, так и по сечению канала. Причина радиальной (поперечной) неравномерности в том, что высокоэнергетичные частицы, попадая в плотный газ через поверхность лазерной трубки, теряют большую часть энергии в пристенной области в столкновениях с атомами гелия. Поэтому энерговыделение в газе максимально вблизи стенок канала и минимально на его оси. Причина продольной неравномерности - в изменении плотности газа вследствие подогрева.

Оценим влияние этих факторов на неравномерность усиления излучения по длине плоского лазерного канала толщиной δ (расстояние между противоположными стенками). Рассматриваем стационарную задачу. Будем считать, что на стенках канала находится поверхностный источник моноэнергетичных ионов, используемых для накачки лазера. Плотность потока энергии ионов в газ со стенки обозначим q_0 ($\text{Вт}/\text{м}^2$). При заданной величине q_0 средняя объемная плотность энерговыделения в газе W ($\text{Вт}/\text{м}^3$) в данном сечении канала определяется по формулам, полученным в [7]:

$$W = \bar{\xi} \frac{2q_0}{\delta}, \quad \bar{\xi} = 2\zeta \left(\frac{\zeta}{2} - 1 - \ln \frac{\zeta}{2} \right), \quad (5)$$

где $\zeta = \delta/l = (\delta/l_0)(T_0/T)$ - относительная толщина канала; l - длина пробега ионов в газе при температуре газа T К; $\bar{\xi}$ - эффективность накачки, характеризующая ту долю энергии ионов, которая осталась в газе с учетом неравномерности энерго-

выделения. Величина $\bar{\xi}$ максимальна и равна 0,648 при $\xi = 0,4$. При $\xi < 0,4$ много ионов поглощается на противоположных стенках канала. При $\xi > 2$ ионы не долетают до оси канала, поэтому $\bar{\xi} = 0$.

Из (5) следует, что при заданном давлении газа (а также φ_0 и δ) плотность энерговыделения в газе является функцией его температуры $W(T)$ за счет температурной зависимости длины пробега ионов, обусловленной зависимостью плотности газа от температуры (рис. 6).

Средняя по сечению канала температура газа повышается в направлении течения за счет поглощения энергии ионов в соответствии с уравнением баланса тепла

$$\rho v c_p \frac{dT}{dx} = W(T(x)) \quad (6)$$

Решая уравнение (6) при постоянном энерговыделении $W_0 = W(T_0)$, получаем закон роста температуры

$$T(x) = T_0 + \frac{W_0 x}{\rho v c_p} \quad (7)$$

где T_0 - температура газа в центре канала. С учетом переменности по сечению энерговыделения в газе его температура повышается медленнее, чем при $W_0 = \text{const}$ (стенки канала охлаждаются специальным теплоносителем, а теплообменом газа со стенками пренебрегаем).

Для снижения неоднородности усиления среды необходимо в центре лазерного канала обеспечить оптимальные условия накачки, то есть минимальную неоднородность возбуждения по сечению канала ($\xi = 0,4$) и оптимальный состав лазерной среды ($[Cd] = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $[He] = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, то есть давление газа 1 атм при $T = 700 \text{ К}$). Следовательно, при температуре газа в среднем сечении канала 700 К оптимальная толщина канала должна быть $\delta = 0,4 \ell = 11 \text{ см}$ [7].

Согласно расчетам (рис. 6) при мощности накачки 50 Вт/см^3 необходимо прокачивать газ со скоростью 500 м/с, чтобы в лазерном канале градиент температуры не превышал 300 К/м. При низком давлении смеси около 1 атм мощность накачки почти постоянна по длине канала, а величина ненасыщенного коэффициен-

та усиления изменяется в пределах 20 % по длине канала.

Заклучение

1. В работе рассмотрена стационарная модель He - Cd лазера ($\lambda = 441,6$ нм), накачиваемого жестким ионизатором.
2. Показано, что мощность лазерного излучения максимальна при оптимальных концентрациях гелия $\sim 10^{19}$ см⁻³ и кадмия $\sim 10^{16}$ см⁻³. Эти концентрации, в отличие от мощности излучения, практически не зависят от мощности накачки, потерь в резонаторных зеркалах и от температуры среды.
3. Для оптимальной плотности лазерно-активного газа, при которой достигается максимум мощности лазерного излучения, определен оптимальный поперечный размер лазерного канала, при котором реализуется максимальная эффективность накачки ионами. При температуре газа 300 + 500°С физические размеры лазерного канала должны быть ~ 11 см.
4. Показано, что вследствие низкого коэффициента усиления среды $\sim 10^{-3} + 10^{-2}$ л/см оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора составляет 10 %.
5. Проведены расчеты мощности энерговыделения и ненасыщенного коэффициента усиления при различных условиях накачки. Показано, что He - Cd-смесь на рассматриваемом переходе Cd II при накачке $W \sim 100$ Вт/см³ имеет слабый коэффициент усиления $\sim 10^{-2}$ л/см. КПД преобразования энергии накачки в когерентное излучение составляет 0,4 + 0,6 %.
6. Исследовано влияние прокачки лазерно-активной среды на условия генерации. Показано, что с учетом неравномерности накачки по длине и по сечению канала при оптимальном давлении гелия около 1 атм, градиент температуры 300 К/м вдоль оси канала вызовет изменение коэффициента усиления на всей длине канала около 20 %, если в среднем сечении канала обеспечить оптимальные условия накачки и усиления.

Список литературы

1. *Fowles G.R., Hopkins B.D. -IEEE J Quantum Electron, 3, 1967, p.419.*
2. Деркиев В.И., Бидков А.В., Карелин А.В. и др. Препринт ИОФАН № 51, М., 1987.
3. Миськевич А.И., Дмитриев А.В., Ильяшенко В.С. и др. -Письма в ЖТФ, 1980, т.6, № 13, с. 818-821.
4. Миськевич А.И., Ильяшенко В.С., Саламаха Б.С. и др. - ЖТФ, 1982, т. 52, № 2, с. 402-404.
5. Гудзенко Л.И., Яковленко С.И. Плазменные лазеры. -М.: Атомиздат, 1978. = 256 с.
6. Яковленко С.И. -В сб.: Физика плазмы. -М.: ВИНИТИ, 1982, с.57-118.
7. Карелин А.В., Серeda О.В., Харитонов В.В. и др. -Атомная энергия, 1986, т. 61, в. 1, с. 44-46.

Таблица . Основные каналы заселения иона $Cd \bar{II}$

Уровни	Тип реакции	Уравнение реакции
$4d^{\text{no}}nlm$	Реакция перезарядки	$He^+ + Cd \rightarrow (Cd^+)^* + He$
$5s^2 \ ^2D_{5/2, 3/2}$	Реакция Пеннинга	$He(2^3S) + Cd \rightarrow Cd(5s^2 \ ^2D_{5/2, 3/2}) + He + e$
$4f^2 \ ^5F_{5/2, 7/2}$	Перезарядка на метастабильях Cd	$He_2^+ + Cd(5^3P_2) \rightarrow Cd(4f^2 \ ^5F_{5/2, 7/2}) + He$
$5s^2 \ ^4D_{5/2}$	Перезарядка на основном состоянии Cd	$He_2^+ + Cd(5s) \rightarrow Cd(5s^2 \ ^4D_{5/2}) + 2He$

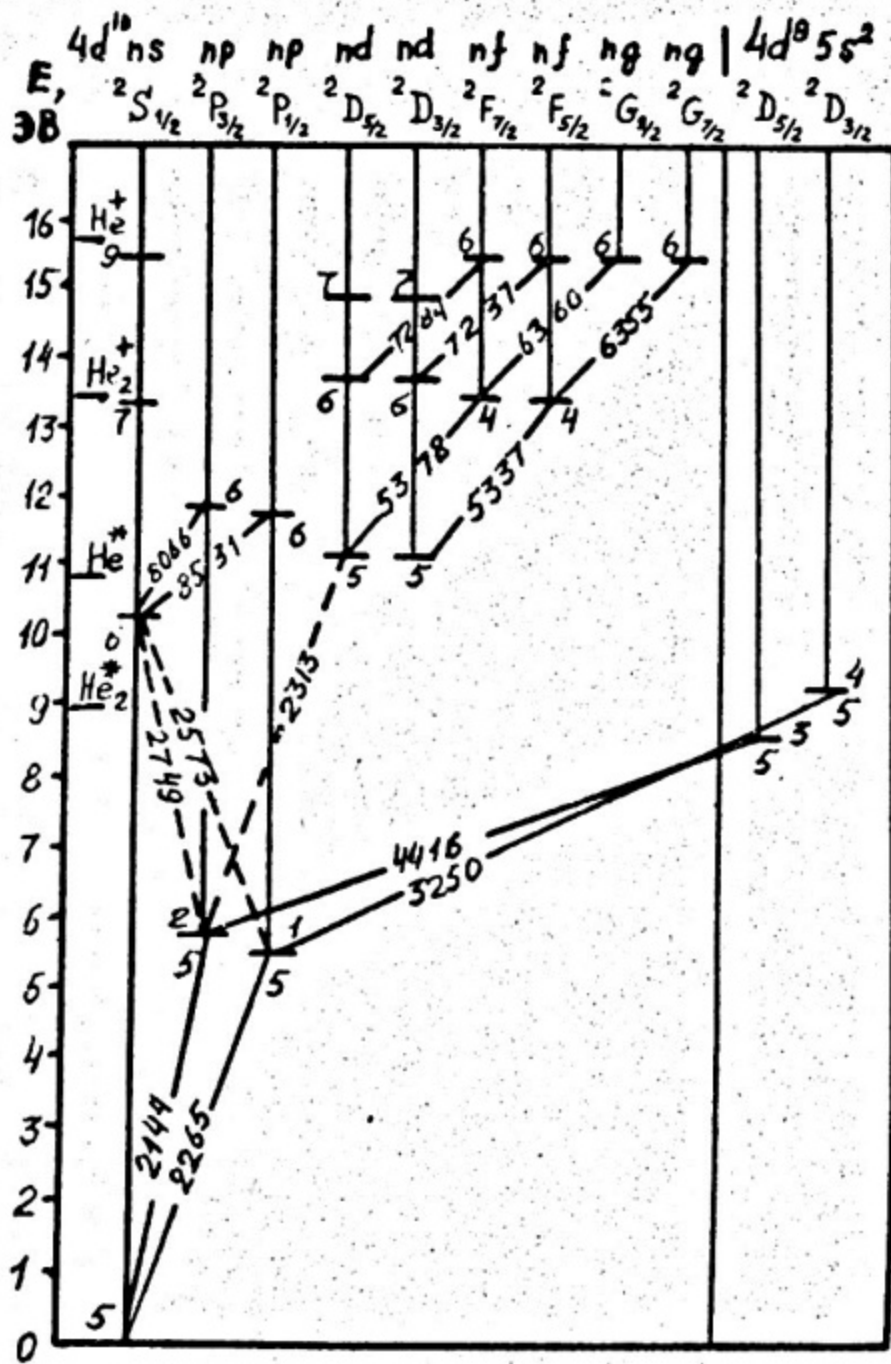


Рис. 1. Энергетические уровни, участвующие в процессах накачки и генерации He - Cd - лазера

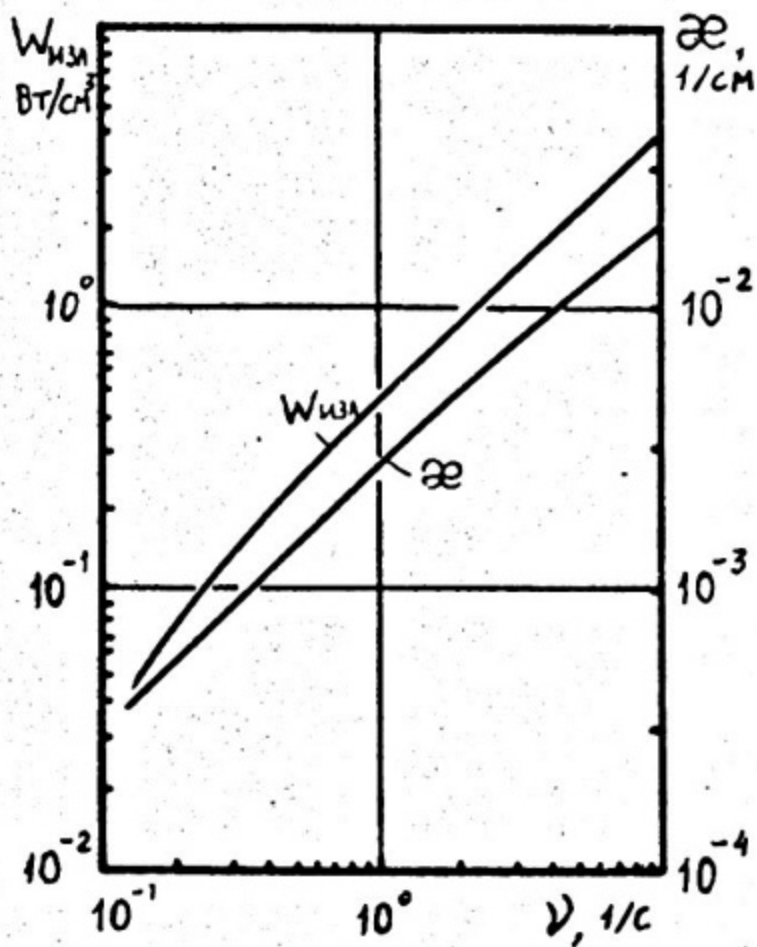


Рис. 2. Зависимость мощности излучения $W_{\text{изл}}$ и ненасыщенного коэффициента усиления α от частоты ионизации ν для следующих параметров смеси He - Cd : плотность гелия $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, кадмия $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, температура газа 700 К. Длина лазерной трубки 60 см, коэффициент пропускания выходного зеркала 2 %

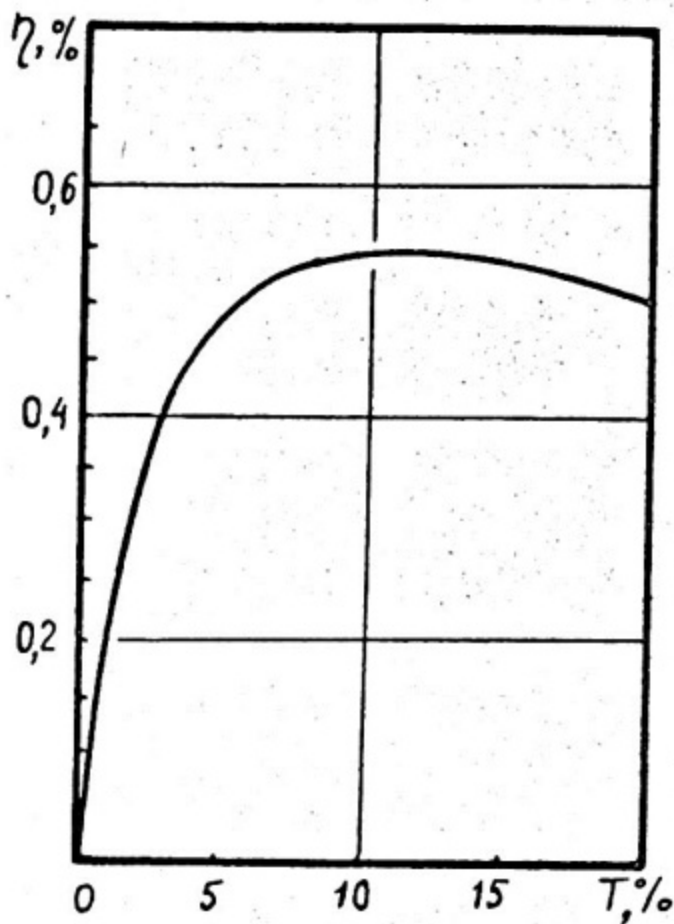


Рис. 3. Лазерный КПД как функция коэффициента пропускания T зеркала резонатора. Мощность накачки 350 Вт/см^3 , длина лазерной трубки 120 см , паразитное поглощение 10^{-4} см^{-1}

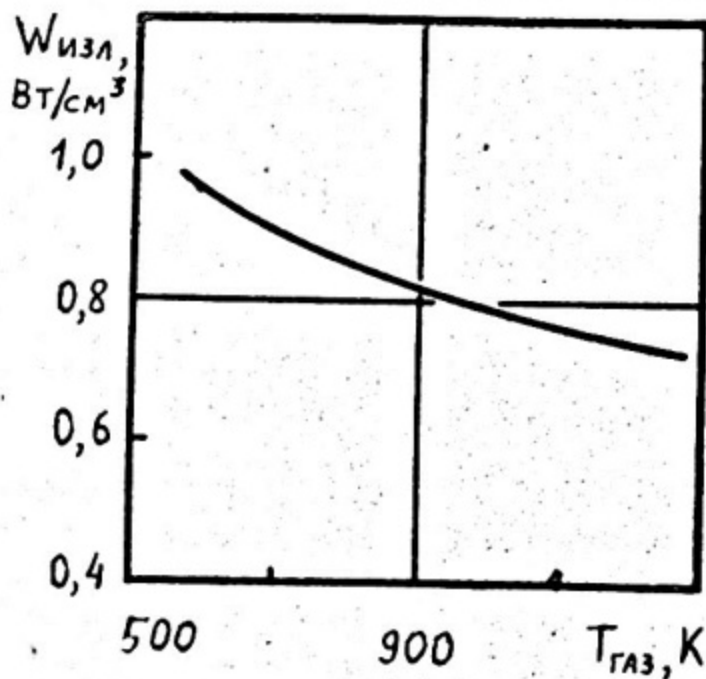


Рис. 4. Зависимость мощности излучения лазера $W_{\text{изл.}}$ от температуры $\text{He} - \text{Cd}$ -смеси для следующих параметров плазмы: $[\text{He}] = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $[\text{Cd}] = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, мощность накачки 150 Вт/см^3 . Параметры резонатора $\ell = 60 \text{ см}$, $T = 2 \%$

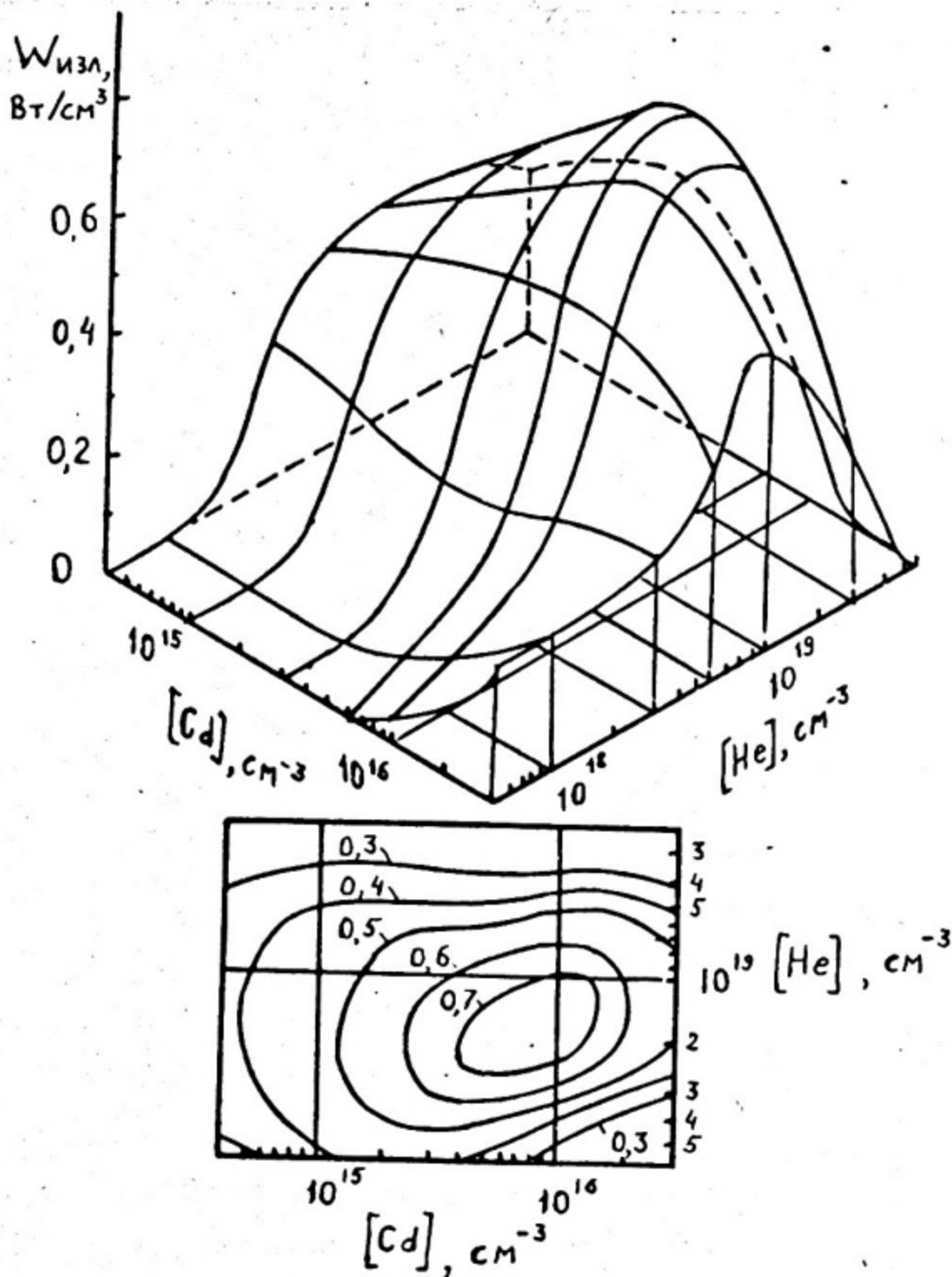


Рис. 5а. Зависимость мощности излучения лазера $W_{\text{изл}}$ от концентрации атомов гелия и кадмия. Температура газа 700 К, мощность накачки 100 Вт/см^3 , длина лазерной трубки 60 см, коэффициент пропускания зеркала 2 %

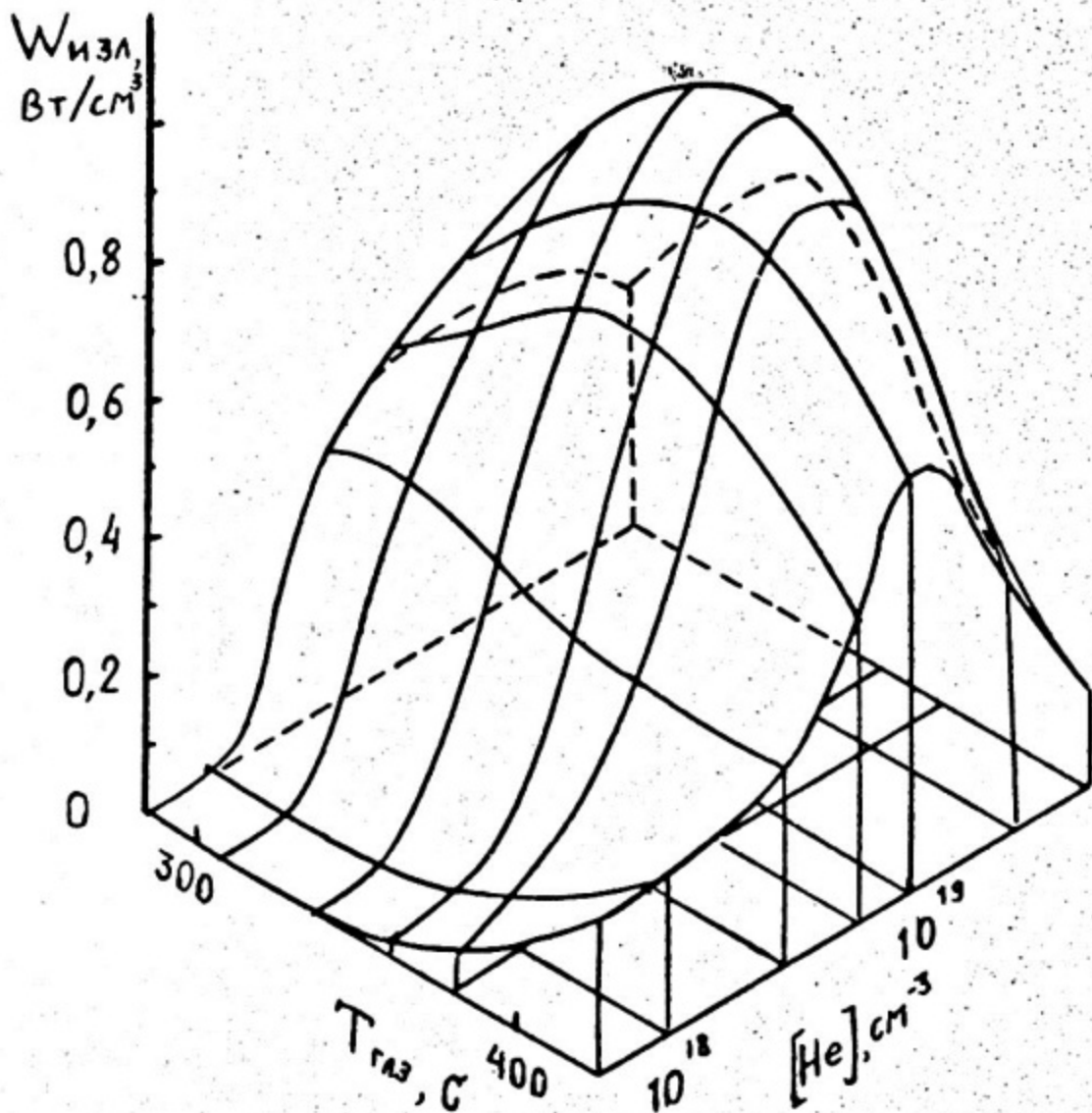


Рис. 56. Зависимость мощности излучения лазера $W_{\text{изл.}}$ от концентрации гелия и температуры паров кадмия. Мощность накачки 100 Вт/см^3 , длина лазерной трубки 60 см , коэффициент пропускания зеркала 2%

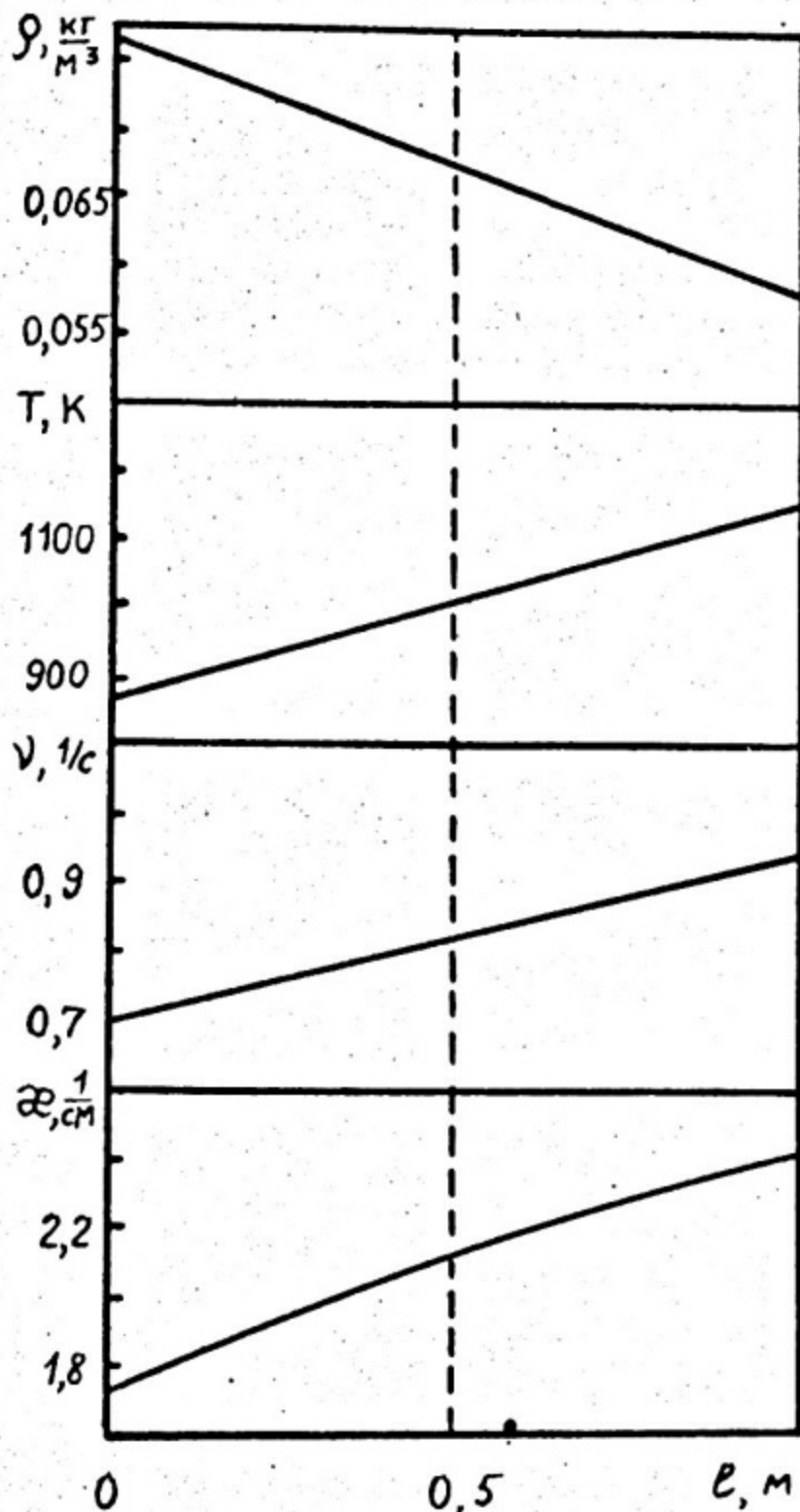


Рис. 6. Изменение плотности ρ , температуры T газа, частоты ионизации ν и коэффициента усиления среды по длине лазерного канала при прокачке активной среды со скоростью 600 м/с. Мощность накачки 60 Вт/см³, давление гелия 1,37 атм, диаметр канала 11,1 см

Содержание

Введение.....	3
1. Плазмохимическая модель гелий-кадмиевого лазера.....	4
2. Оптимизация состава гелий-кадмиевого лазера.....	5
3. Влияние неравномерности энерговыделения в газовой среде на коэффициент усиления лазера.....	7
Заключение.....	9
Список литературы.....	10

Василий Иванович Держиев
Константин Рудольфович Чикин
Александр Витальевич Карелин
Владимир Витальевич Харитонов
Сергей Иванович Яковленко

Оптимальные условия накачки гелий-кадмиевого
лазера высокого давления

Рукопись поступила в издательский отдел 9.II.87

Ответственный за выпуск К.Р. Чикин

Л. - 49690 Подписано в печать 25/XII - 1987г. Формат 60x84 1/16
П.л. 1,25 Уч.-изд.л. 1,0 Тираж 120 экз.
Изд. № 065-87 Заказ 3741 Цена 10 коп.

Типография МИФИ, Каширское шоссе, д. 31