

УСИЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ГЕНЕРАЦИИ
В РАЗРЯДЕ ПОЛОГО КАТОДА

Б. С. Могильницкий

Экспериментально исследовано усиление стимулированного излучения в смеси He—Ne в разряде полого катода на переходах $3s_2-2p_4$ ($\lambda=0.63$ мкм), $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм), $3s_2-3p_4$ ($\lambda=3.39$ мкм). Определены оптимальные по усилению параметры разряда на исследуемых переходах. Измерены ненасыщенные коэффициенты усиления на этих переходах, которые составили значения величин: для $\lambda=0.63$ мкм 0.66 моль%, для $\lambda=1.15$ мкм — 6 моль%, для $\lambda=3.39$ мкм ~ 0.1 моль% (диаметр разрядной трубки 5 мм). Сравнением ненасыщенных коэффициентов усиления для переходов, связанных общим верхним уровнем, показано различие в заселенности нижних уровней в разряде полого катода и в разряде положительного столба. В полом катоде возбуждает He—Ne смесь таким образом, что вышележащий уровень $3p_4$ заселен значительно больше уровня $2p_4$, что прямо противоположно заселенности этих же уровней в разряде положительного столба.

В работах [1, 2] показано, что в разряде полого катода наблюдается инверсная заселенность уровней, уверенно генерирующих в разряде положительного столба. Специфика разряда в полом катоде заключается в отличии функции распределения электронов по энергиям от максвелловской [3], характерной для разряда положительного столба, что для случая неоновой плазмы ведет к большей инверсной заселенности $2p$ (по Пашену) уровней неона [4, 5]. Эта особенность разряда полого катода должна отразиться на усилении активной среды, в качестве которой использовалась He—Ne смесь.

Необходимо отметить преимущество разряда полого катода, заключающееся в отсутствии бегущих страт в широком интервале давлений неона и разрядных токов [6], часто возникающих в разряде положительного столба и, модулирующих выходное излучение [7]. Этот недостаток разряда положительного столба является серьезной трудностью при создании стабилизированных по частоте лазеров. В настоящее время данные по усилению He—Ne смеси в разряде полого катода имеются только для переходов $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм) [8, 9].

В данной работе экспериментально исследовалось усиление He—Ne смеси в разряде полого катода на переходах $3s_2-2p_4$ ($\lambda=0.63$ мкм), $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм), $3s_2-3p_4$ ($\lambda=3.39$ мкм) с целью определения оптимальных условий генерации. Первоначально определялись оптимальные параметры: $i_{\text{разр.}}$, $P_{\text{He}}:P_{\text{Ne}}$, $P_{\text{см.}}$. Затем измерялся ненасыщенный коэффициент усиления исследуемых переходов.

Эксперимент проводился с He—Ne лазером (разряд положительного столба), который использовался в качестве «зондирующего» лазера и усиленной трубки (разряд полого катода), помещенных в один резонатор. Полюс катод [10] имел длину разрядного промежутка 100 мм, диаметр 3 и 5 мм. Выбор видов генерации осуществлялся сменой зеркал. Измерения проводились в широком интервале давлений смеси и разрядных токов. Для характеристики усиления полого катода введем коэффициент усиления

$$K = \frac{P_1}{P_0},$$

где P_0 — выходная мощность «зондирующего» луча, P_1 — выходная мощность усиленного луча. Уровень выходной мощности «зондирующего» лазера задавался минимальным (порог генерации), чтобы избежать эффектов насыщения и максимально приблизиться к значению ненасыщенного коэффициента усиления ¹ среды в разряде полого катода.

На рис. 1 приведена зависимость усиления от давления He—Ne смеси и разрядного тока при разных соотношениях компонент смеси для перехода $2s_2-2p_4$ ($\lambda=0.63$ мкм). Оптимальные давления смеси находятся в области $0.6\div 0.8$ мм рт. ст., неона — $0.1\div 0.12$ мм рт. ст. Причем при увеличении давления неона максимум усиления плавно сдвигается в сторону больших давлений смеси. Зависимость усиления от тока разряда нелинейна и при плотности тока, большей 10 ма/см², наступает насыщение усиления.

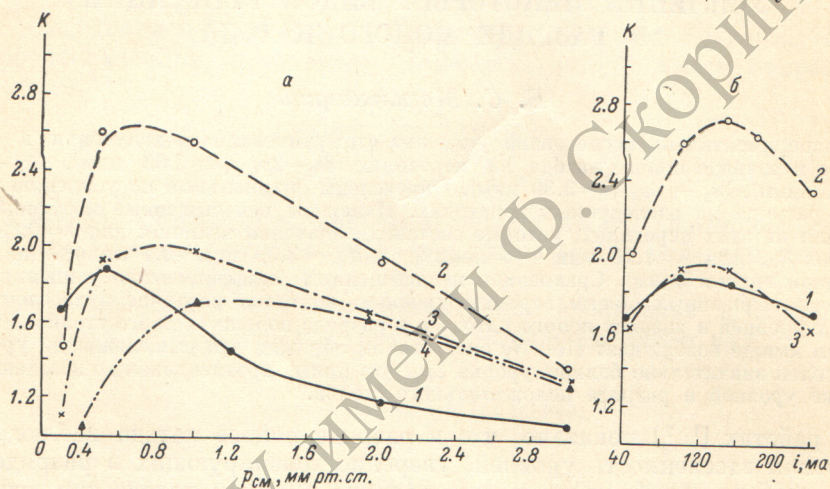


Рис. 1.

a — зависимость усиления на $\lambda=0.63$ мкм от давления смеси ($p_{см}$) при давлениях неона (мм рт. ст.): 1 — 0.08, 2 — 0.12, 3 — 0.16, 4 — 0.4; *б* — зависимость усиления на $\lambda=0.63$ мкм от величины разрядного тока при соотношениях компонент смеси $p_{Ne}-p_{He}$: 1 — 1:5, 2 — 1:3, 3 — 1:2.

Необходимо отметить тот факт, что с уменьшением диаметра полого катода оптимальное давление смеси неона смещается в область больших давлений. Так, для диаметра 3 мм оптимальное давление смеси составляет 1.2 мм рт. ст., неона — 0.15 мм рт. ст. В случае большего диаметра полого катода (13 мм) [11] оптимальное давление смеси 0.3 мм рт. ст., неона — 0.08 мм рт. ст. Таким образом, оптимальное давление смеси обратно пропорционально диаметру полого катода. Такая же зависимость наблюдается для плотности разрядного тока: для диаметра 13 мм оптимальная плотность разрядного тока 6 ма/см², для диаметра 5 мм — 10 ма/см², для диаметра 3 мм — 12 ма/см². Оптимальное соотношение компонент смеси устанавливается таким образом, что с уменьшением диаметра полого катода возрастает содержание гелия: для диаметра 13 мм He : Ne = 3 : 1, 5 мм — He : Ne = 5 : 1, 3 мм — He : Ne = 7 : 1. Такой характер изменения соотношений компонент смеси может быть объяснен увеличением разрушающего фактора стенок трубки, который уменьшает количество метастабилей гелия.

Для перехода $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм) характерны два максимума в зависимости усиления от давления смеси (рис. 2). Эта особенность отмечалась также в работах [11, 12], и первый максимум усиления объясняется

¹ Если специально не оговорено, экспериментальные данные относятся к диаметру 5 мм.

² При снятии характеристик на этом переходе в качестве бристеровских окон были использованы стеклянные пластинки, чтобы устранить возможное влияние генерации на $\lambda=3.39$ мкм (конкуренция переходов на $\lambda=0.63$ мкм и $\lambda=3.39$ мкм в «зондирующем» лазере) на усиление в разряде полого катода.

каскадными переходами возбужденных атомов неона на уровень $2s_2$ с верхних уровней, а также эффективной заселенностью этого уровня прямым электронным возбуждением. Кроме того, наличие первого максимума объясняется неупругими процессами второго рода, переводящими метастабиль гелия из состояния 2^1S_0 в состояние 2^3S_1 и, таким образом, повышающими заселенность уровня $2s_2$ неона [13]. Однако необходимо отметить тот факт, что первый максимум усиления уменьшается с ростом давления неона и исчезает совсем при давлениях неона, больших 0.3 мм рт. ст. При постоянной концентрации атомов гелия и плотности разрядного тока такое незначительное увеличение давления неона не должно так резко влиять на процесс перевода метастабилей гелия из состояния 2^1S_0 в состояние 2^3S_1 . Вероятно, исчезновение первого максимума связано с уменьшением элек-

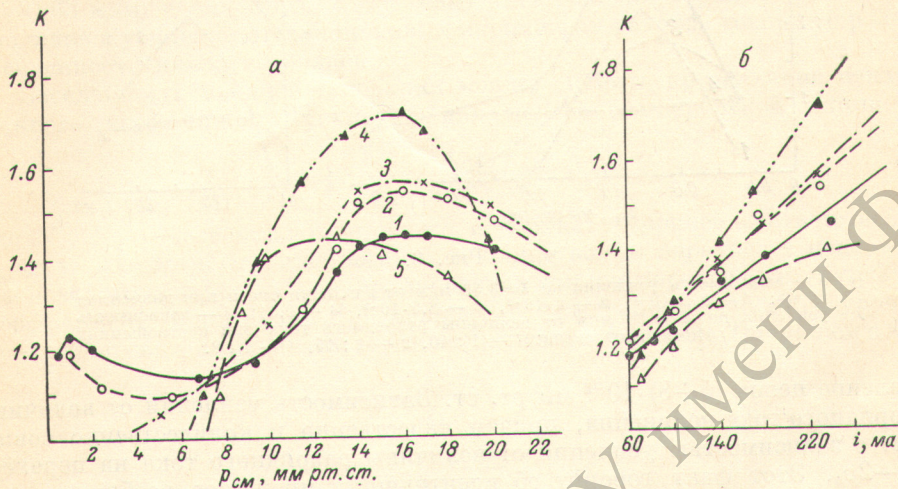


Рис. 2.

a — зависимость усиления на $\lambda=1.15$ мкм от давления смеси при давлении неона: 1 — 0.07, 2 — 0.15, 3 — 0.3, 4 — 0.5, 5 — 1; *б* — зависимость усиления на $\lambda=1.15$ мкм от величины разрядного тока при соотношении компонент смеси: 1 — 1 : 200, 2 — 1 : 100, 3 — 1 : 50, 4 — 1 : 30, 5 — 1 : 15 (обозначения рис. 2 *a*).

тронной температуры и увеличением роли ступенчатого возбуждения нижнего уровня $2p_4$ с $1s$ уровней неона. Оптимальная заселенность уровня $2s_2$ неона наблюдается при давлении смеси 14–16 мм рт. ст. и давлении неона 0.5 мм рт. ст. Зависимость усиления от величины разрядного тока линейна, что указывает на отсутствие процессов ступенчатого возбуждения уровня $2p_4$ из состояний $1s$ неона при исследуемых плотностях разрядного тока. Угол наклона прямых зависимости усиления от тока разряда растет с увеличением давления неона, что может быть объяснено эффективностью прямого электронного возбуждения метастабилей гелия 2^3S_1 . Линейная зависимость усиления от тока разряда в условиях нашего эксперимента объясняется тем, что плотность разрядного тока, необходимая для насыщения на этом переходе для диаметра 5 мм, составляет величину 24 ма/см^2 [12]. Таким образом, измерения проводились на линейном участке зависимости усиления от плотности разрядного тока, которая изменялась в условиях эксперимента в интервале 4–15 ма/см². Нелинейный характер зависимости усиления от величины разрядного тока наблюдается при давлениях неона, больших 1 мм рт. ст. При этих давлениях неона значительную роль начинают играть процессы ступенчатого возбуждения нижнего уровня $2p_4$ с $1s$ уровней неона. Для диаметра 7 мм [8] оптимальное давление смеси 11 мм рт. ст. Таким образом, и на этом переходе наблюдается обратная зависимость оптимального давления смеси и неона от диаметра полого катода. Эта зависимость удовлетворяет соотношениям, определенным в [12].

Усиление He—Ne смеси на переходе $3s_2-3p_4$ (рис. 3) незначительно и находится в области малых давлений смеси. Максимум усиления наблюдается при давлении смеси 1 мм рт. ст. и плотности разрядного тока 10 ма/см^2 при соотношении компонент смеси $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 16 : 1$. Оптимальное

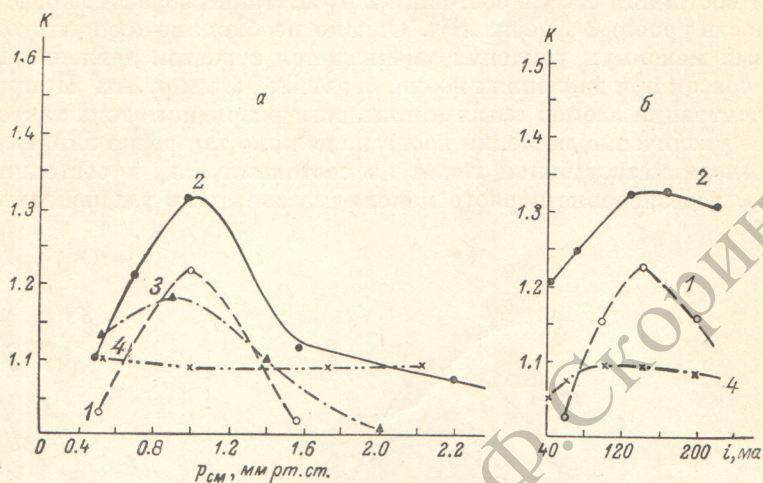


Рис. 3.

а — зависимость усиления на $\lambda = 3.39 \text{ мкм}$ от давления смеси при давлениях неона: 1 — $2.5 \cdot 10^{-2}$, 2 — $6 \cdot 10^{-2}$, 3 — $8.5 \cdot 10^{-2}$, 4 — 0.11; б — зависимость усиления на $\lambda = 3.39 \text{ мкм}$ от величины разрядного тока при соотношениях компонент смеси: 1 — 1 : 40, 2 — 1 : 15, 4 — 1 : 8.

давление неона $(5 \div 8) \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ Зависимость усиления от величины разрядного тока нелинейна, причем качественно и количественно совпадает с зависимостью усиления от величины разрядного тока на переходе $3s_2-2p_4$. Этот факт говорит об идентичности процессов возбуждения и заселенности верхнего уровня $3s_2$ обоих переходов.

Значения ненасыщенных коэффициентов усиления для двух видов тлеющего разряда

λ , мкм	Пологий катод, $d = 5 \text{ мм}$		Положительный столб, $d = 7 \text{ мм}$	
	G_0 , моль %	параметры разряда	G_0 , моль %	параметры разряда
0.63	0.66	$p_{\text{см.}} = 1 \text{ мм рт. ст.}$ $J = 9 \text{ ма/см}^2$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 10 : 1$	2	$p_{\text{см.}} = 0.6 \text{ мм рт. ст.}$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 5 : 1$
1.15	6	$p_{\text{см.}} = 15 \text{ мм рт. ст.}$ $J = 15 \text{ ма/см}^2$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 30 : 1$	12	$p_{\text{см.}} = 1.1 \text{ мм рт. ст.}$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 10 : 1$
3.39*	~ 0.1	$p_{\text{см.}} = 1 \text{ мм рт. ст.}$ $J = 9 \text{ ма/см}^2$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 15 : 1$	$1.6 \cdot 10^4$	$p_{\text{см.}} = 0.6 \text{ мм рт. ст.}$ $p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} = 5 : 1$

Примечание. $j = i/s$, где i — величина разрядного тока (ма), s — площадь рабочей поверхности полого катода (см^2).

* Усиление на переходе $3s_2-3p_4$ настолько незначительно, что не представилось возможным уверенно измерить его этим способом. Величина усиления на этом переходе, по нашим измерениям, по крайней мере не больше величины, приведенной в таблице.

Таким образом, можно качественно сравнить усиление на исследуемых переходах в разряде положительного столба и в разряде полого катода. Исследуемые переходы были выбраны не случайно: два из них ($\lambda = 0.63$ и 3.39 мкм) связаны верхним уровнем $3s_2$ и два нижним $2p_4$ ($\lambda = 0.63$, 1.15 мкм). В разряде положительного столба все три вида генерации наблюдаются примерно в одинаковых условиях разряда и характеризуются ана-

логичными зависимостями мощности генерации от параметров разряда. В разряде же полого катода наблюдается резкая аномальность параметров разряда (давление смеси) оптимального усиления на $\lambda=1.15$ мкм по сравнению с параметрами разряда на других переходах.

Для количественного сравнения заселенностей уровней исследуемых переходов в разряде положительного столба и в разряде полого катода измерялся ненасыщенный коэффициент усиления, поскольку он является характеристикой инверсной заселенности уровней генерации [14]. Измерение коэффициента усиления проводилось по методике, изложенной в работе [15] при оптимальных по усилению параметрах разряда в полом катоде. Измеренные значения коэффициентов усиления сведены в таблицу, где для удобства сравнения приведены значения коэффициентов усиления в разряде положительного столба из [16]. Поскольку переходы $3s_2-2p_4$ ($\lambda=0.63$ мкм) и $3s_2-3p_4$ ($\lambda=3.39$ мкм) имеют общий верхний уровень, то различие в усилении при одинаковых параметрах разряда говорит о разной заселенности нижних уровней.

Заселенность уровней генерации можно оценить по величине ненасыщенного коэффициента усиления для центра доплеровской линии [16]

$$G_0 = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda_0^2 A_{21} g_2}{\Delta \nu_D 4\pi} \left(\frac{N_2}{g_2} - \frac{N_1}{g_1} \right), \quad (1)$$

где N_1, N_2 — заселенность нижнего и верхнего уровней соответственно, g_1, g_2 — их статистические веса, λ_0 — длина волны перехода в центре доплеровского контура, $\Delta \nu_D$ — доплеровская ширина перехода, $A_{21} \approx \gamma_{21}/2\pi$ — коэффициент Эйнштейна. Для сравнения заселенностей нижних уровней переходов, связанных общим верхним уровнем, выражение (1) запишем в виде

$$N_1 = \frac{g_1}{g_2} (N_2 - N_0), \quad (2)$$

где

$$N_0 = G_0 \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \frac{\Delta \nu_D 8\pi^2}{\lambda_0^2 \gamma_{21}}.$$

Для случая разряда в полом катоде были использованы следующие значения величин [17]: переход $3s_2-2p_4$ — $\Delta \gamma_D = 1.7 \cdot 10^9$ сек.⁻¹, $\gamma = 3 \cdot 10^7$ сек.⁻¹, $\lambda_0 = 6.328 \cdot 10^{-5}$ см, $g_2 = 3$, $g_1 = 5$, $G_0 = 6.6 \cdot 10^{-5}$ см⁻¹; переход $3s_2-3p_4$ — $\Delta \nu_D = 3.1 \cdot 10^8$ сек.⁻¹, $\gamma = 2.3 \cdot 10^8$ сек.⁻¹, $\lambda_0 = 3.39 \cdot 10^{-4}$ см, $g_1 = 5$, $g_2 = 3$, $G_0 = 10^{-5}$ см⁻¹. Тогда для перехода $3s_2-2p_4$ $N_0 = 1.56 \cdot 10^8$ см⁻³, для перехода $3s_2-3p_4$ $N_0 = 1.96 \cdot 10^6$ см⁻³.

Для случая разряда с положительным столбом для перехода $3s_2-2p_4$ — $G_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹ и $N_0 = 4.72 \cdot 10^8$ см⁻³, для перехода $3s_2-3p_4$ — $G_0 = 1.6$ см⁻¹ и $N_0 = 3.12 \cdot 10^{11}$ см⁻³.

Таким образом в разряде полого катода $N_1(2p_4) \ll N_1(3p_4)$, а в разряде с положительным столбом $N_1(2p_4) > N_1(3p_4)$. Сравнение ведется в предположении $N_2 = \text{const}$. Это соответствует одинаковым параметрам разряда для обоих переходов в одном и том же виде тлеющего разряда. Таким образом, в разряде полого катода, по данным нашего эксперимента, уровень $3p_4$ заселен значительно больше уровня $2p_4$. В разряде же с положительным столбом, наоборот, уровень $2p_4$ заселен больше уровня $3p_4$. В этом наглядно проявляется специфика разряда в полом катоде при возбуждении He—Ne смеси. Для переходов, связанных общим нижним уровнем, такое сравнение заселенности верхних уровней провести нельзя, поскольку в разряде полого катода наблюдается различие параметров разряда (давление смеси, ток разряда) на $\lambda=1.15$ мкм по сравнению с параметрами разряда на $\lambda=0.63$ мкм. Это нарушает условие $N_1 = \text{const}$.

Что касается перехода $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм), то усиление в обоих видах разряда сравнимо, хотя в полом катоде оно несколько больше,³

³ При другой геометрии полого катода получено усиление 19 моль% [8] и 15 моль% [9].

как для He—Ne смеси, так и для чистого неона. Одинаковость усиления He—Ne смеси на $\lambda=1.15$ мкм достигается при разных условиях: в положительном столбе при параметрах разряда, идентичных двум другим переходам, в полом катоде при резкой аномальности параметров разряда (давление смеси 15 мм рт. ст.) на этом переходе по сравнению с двумя остальными.

Если провести сравнение усиления по отдельным видам генерации, то

1) на переходе $3s_2-2p_4$ ($\lambda=0.63$ мкм) усиление в полом катоде на порядок меньше, чем в разряде положительного столба, что может быть объяснено большей заселенностью $2p$ -уровней неона в разряде полого катода за счет наличия быстрых электронов;

2) на переходе $2s_2-2p_4$ ($\lambda=1.15$ мкм) усиление примерно одинаковое в обоих видах тлеющего разряда, параметры разряда (давление смеси) резко различаются;

3) на переходе $3s_2-3p_4$ ($\lambda=3.39$ мкм) усиление в разряде полого катода очень незначительно, в разряде же положительного столба самое большое из известных переходов в He—Ne смеси.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: 1) разряд в полом катоде возбуждает He—Ne смесь таким образом, что вышележащий уровень $3p_4$ заселен значительно больше, чем уровень $2p_4$, что прямо противоположно заселенности этих же уровней в разряде положительного столба; 2) разряд в полом катоде целесообразно использовать для возбуждения переходов, верхний уровень которых совпадает с уровнями наибольшей заселенности в этом виде тлеющего разряда. К этим переходам следует отнести группу переходов $2s-2p$, $3p-2s$.

Литература

- [1] Ш. К. Десаи, Ю. М. Каган. Опт. и спектр., 28, 435, 1970.
- [2] Ш. К. Десаи, Ю. М. Каган. Опт. и спектр., 28, 650, 1970.
- [3] В. П. Гофмейстер, Ю. М. Каган. Rev. Roum. Phys., 13, 19, 1968.
- [4] И. П. Богданова, Чен Ги Тхек. Опт. и спектр., 2, 681, 1957.
- [5] В. С. Бородин, Ю. М. Каган. Опт. и спектр., 18, 966, 1965.
- [6] Б. И. Москалев. Электронная техника, сер. 1, «Электроника СВЧ», вып. 9, 92, 1969.
- [7] С. А. Алякшишев, Д. В. Гордеев, Е. П. Остапченко, Л. М. Пяткова. Радиотехника и электроника, 12, 1769, 1967.
- [8] И. И. Муравьев, А. Н. Солдатов, В. И. Климкин, А. М. Янчарина. Изв. вузов, физика, 12, 125, 1968.
- [9] J. Smith. J. Appl. Phys., 35, 723, 1964.
- [10] Б. С. Могильницкий. Ж. прик. спектр., 17, 408, 1972.
- [11] В. П. Чеботаев. Радиотехника и электроника, 12, 372, 1965.
- [12] В. Б. Знаменский, Г. Н. Буйнов, Э. С. Бурсаков. Опт. и спектр., 20, 522, 1966.
- [13] А. Н. Солдатов. Опт. и спектр., 31, 181, 1971.
- [14] А. Митчелл, М. Земанский. Резонансное излучение и возбужденные атомы. ОНТИ, М.—Л., 1937.
- [15] Ю. В. Троицкий, В. П. Чеботаев. Опт. и спектр., 20, 362, 1966.
- [16] В. Беннет. Газовые лазеры. Изд. «Мир», 1964.
- [17] M. Gronchi, A. Sona. Riv. Nuova Sim., 2, 219, 1970 (Экспресс-информация «Квантовая радиотехника», № 29, 1971).

Поступило в Редакцию 11 апреля 1973 г.