

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования

Московский технический университет связи и информатики

Г.М.Аристархов, А.А.Елизаров, В.И.Николотов

**ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ
И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

в вопросах и ответах

Часть 3

КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Учебное пособие

Москва 2013

УДК 621.38

Аристархов Г.М., Елизаров А.А., Николотов В.И. Приборы сверхвысоких частот и оптического диапазона в вопросах и ответах. Ч. 3. Квантовые приборы: Учебное пособие / МТУСИ. – М., 2013. – 65 с.

Настоящее пособие «Часть 3. Квантовые приборы» является логическим завершением учебно-методического обеспечения дисциплины «Приборы сверхвысоких частот и оптического диапазона (ПСВЧ и ОД). Как и ранее изданные пособия «Часть 1. Электровакuumные приборы СВЧ» и «Часть 2. Полупроводниковые приборы СВЧ», данное пособие содержит тестовые задания в виде контрольных вопросов с альтернативными вариантами по физическим основам квантовой электроники, включая разделы курса ПСВЧ и ОД.

С целью облегчения изучения курса ПСВЧ и ОД, особенно для студентов заочной и дистанционной форм обучения, в пособии приведены необходимые пояснения – ответы на предлагаемые контрольные вопросы, что способствует улучшению качества самостоятельной работы студентов не только упомянутых форм обучения, но и студентов-очников, у которых также могут встречаться трудности при самостоятельной работе.

Пособие предназначено для студентов вузов связи, обучающихся по профилю «Многоканальные телекоммуникационные системы». Данное пособие может оказаться полезным и для преподавателей.

Издание утверждено Методическим советом университета в качестве учебного пособия. Протокол № 3 от 12.02.2013 г.

Рецензенты: В.Н.Акимов, к.т.н., доцент (МТУСИ)

В.Н.Нефёдов, д.т.н., профессор (МГТУ МИРЭА)

© Московский технический университет
связи и информатики, 2013г.

Содержание

Часть I. Контрольные вопросы	6
Раздел 1. Контрольные вопросы к разделу «Физические основы квантовой электроники»	6
1.1 Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов....	6
1.2 Ширина спектральной линии.....	10
1.3 Возможность усиления электромагнитного поля в квантовых системах.	12
Раздел 2. Контрольные вопросы к разделу «Квантовые приборы».....	16
2.1 Оптические квантовые генераторы.....	16
2.2 Условия возбуждения квантовых генераторов	25
2.3 Светодиоды.....	27
2.4 Фотоприемные устройства.....	27
2.5 Фоторезисторы	29
2.6 Оптроны	30
Часть II. Ответы на контрольные вопросы.....	31
Раздел 1. Ответы на контрольные вопросы раздела 1 «Физические основы квантовой электроники»	31
1.1 Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов..	31
1.2 Ширина спектральной линии.....	34
1.3 Возможность усиления электромагнитного поля в квантовых системах.	38
Раздел 2. Ответы на контрольные вопросы «Квантовые приборы»	41
2.1 Оптические квантовые генераторы.....	41
2.2 Условия возбуждения квантовых генераторов	57
2.3 Светодиоды.....	58
2.4 Фотоприемные устройства.....	59
2.5 Фоторезисторы	63
2.6 Оптроны	63

ЧАСТЬ I. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Раздел 1. Контрольные вопросы к разделу «Физические основы квантовой электроники»

1.1 Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов

1.1.1 В квантовых приборах (в отличие от электронных приборов) рабочей средой является...

- а) высокоразреженный вакуум,
- б) твердое тело,
- в) микрочастицы вещества (молекулы, ионы, атомы, электроны и др.), которые взаимодействуют между собой.

Верно: ...

1.1.2 В квантовых приборах происходит усиление энергии высокочастотного электромагнитного поля в результате...

- а) скоростной модуляции электронного потока, переходящего в модуляцию по плотности,
- б) взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем бегущей (обратной) волны,
- в) превращения внутренней избыточной энергии микрочастиц вещества (молекул, ионов, атомов, электронов) в энергию высокочастотного электромагнитного поля.

Верно: ...

1.1.3 Квантовая система — это система элементарных частиц взаимодействующих между собой, поведение которых подчиняется законам...

- а) классической физики,
- б) релятивистским соотношениям,
- в) квантовой механики.

Верно: ...

1.1.4 В соответствии с законами квантовой механики внутренняя энергия изолированной микрочастицы может принимать...

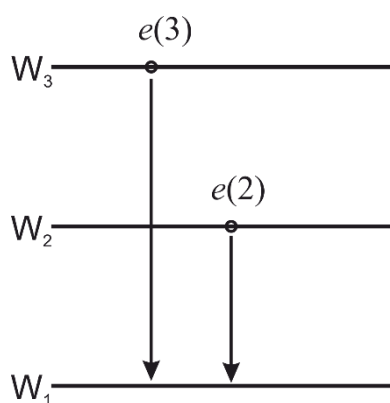
- а) лишь дискретные значения, называемые уровнями энергии (энергетические уровни),

б) любые значения, непрерывно (плавно) изменяющейся энергии.

Верно: ...

1.1.5 В квантовой трехуровневой энергетической системе существует вероятность того, что микрочастицы (например, электроны), могут самопроизвольно отдать свою энергию при переходе на нижний энергетический уровень W_1 . Причем $W_3 > W_2 > W_1$, $e(3)$, $e(2)$ – состояние микрочастиц.

1.1.5.1. В результате показанных квантовых переходов большей излучательной энергией обладает фотон...



а) излучаемый электроном $e(2)$,

б) излучаемый электроном $e(3)$

Верно: ...

1.1.5.2. большой импульс
(количество движений) соответствует фотону...

а) излучаемому электроном $e(2)$,

б) излучаемому электроном $e(3)$,

Верно: ...

1.1.6 Процесс спонтанного излучения оказывает влияние на населенность энергетического уровня N_i ...

а) увеличивая населенность,

б) уменьшая населенность,

в) не изменяя населенность уровня N_i .

Верно: ...

1.1.7 В квантовой многоуровневой системе, в отсутствие стороннего электромагнитного поля, вероятность спонтанного перехода микрочастицы с нижнего уровня на верхний ...

а) велика,

б) мала,

в) отсутствует,

г) возможна,

д) невозможна.

Верно: ...

1.1.8 В квантовой, двухуровневой энергетической системе с населенностью N_2 микрочастиц с энергией W_2 и с населенностью N_1 микрочастиц с энергией W_1 возникает спонтанный квантовый переход микрочастиц, вероятность которого в единицу времени оценивается коэффициентом Эйнштейна A_{21} .

Какими параметрами квантовой системы определяется число спонтанных переходов n_{21} в единицу времени с уровня W_2 на уровень W_1 ...

- а) W_2 ,
- б) W_1 ,
- в) N_1 ,
- г) N_2 ,
- д) A_{21} ,
- е) $W_2 - W_1$,
- ж) $h\nu_{21}$.

Верно: ...

1.1.9 В квантовой, двухуровневой энергетической системе с населенностью N_2 микрочастиц с энергией W_2 и с населенностью N_1 микрочастиц с энергией W_1 возникает спонтанный квантовый переход микрочастиц, вероятность которого в единицу времени оценивается коэффициентом Эйнштейна A_{21} .

Какими параметрами квантовой системы определяется мощность P_{21} спонтанного излучения...

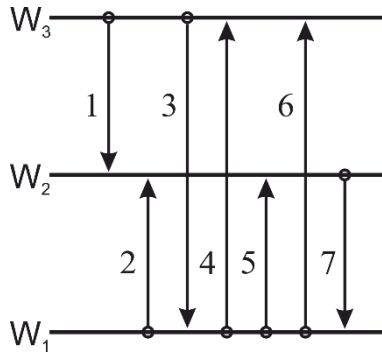
- а) W_1, W_2 ,
- б) N_1, N_2 ,
- в) n_{21}, n_{12} ,
- г) A_{21} ,
- д) $h\nu_{21}$,
- е) $W_2 - W_1$.

Верно: ...

1.1.10 Вынужденные (индуцированные внешним электромагнитным полем с объемной плотностью поля ρ) переходы (подобно спонтанным) имеют статистический характер и свои вероятностные коэффициенты: B_{21} — вероятность вынужденного излучательного перехода сверху вниз и B_{12} — вероятность вынужденного перехода

снизу вверх в 1 с., где B_{21} и B_{12} – коэффициенты Эйнштейна вынужденных квантовых переходов.

На рисунке многоуровневой квантовой системы микрочастиц, пользуясь коэффициентами Эйнштейна обозначить возможные вынужденные переходы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 под воздействием внешнего электромагнитного поля с плотностью ρ , как с излучением кванта энергии, так и с поглощением кванта энергии...



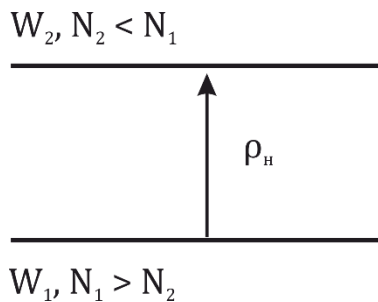
Верно: 1...
2...
3...
4...
5...
6...
7...

1.1.11 В квантовой системе микрочастиц под влиянием внешнего электромагнитного поля с частотой ν_{21} происходит вынужденное излучение кванта энергии, которое...

- а) увеличивает энергию электромагнитного поля с частотой ν_{21} ,
- б) уменьшает энергию электромагнитного поля,
- в) не изменяет энергию электромагнитного поля.

Верно: ...

1.1.12 В квантовой энергетической двухуровневой ($W_1, W_2; W_2 > W_1$)



системе с населенностями микрочастиц на уровнях N_1, N_2 соответственно, осуществляется накачка электромагнитным полем. Возможно ли при этом обеспечить создание в квантовой системе состояния микрочастиц инверсной населенностью? ...

- а) невозможно; почему?
- б) возможно; почему?

Верно: ...

1.2 Ширина спектральной линии

1.2.1 В реальной квантовой системе с ансамблем одинаковых микрочастиц, имеющих энергетические уровни W_2 и W_1 ($W_2 > W_1$) совершаются излучательные переходы сверху вниз с...

- а) единственной частотой ν_{21} или ω ,
- б) набором частот: ν_{min} , ν_{21} , ν_{max}

Верно: ...

1.2.2 В квантовой системе микрочастиц с рабочими уровнями W_2 и W_1 ширина спектральной линии излучения зависит от ...

- а) количества микрочастиц,
- б) времени жизни микрочастицы на рабочем уровне W_1 ,
- в) времени жизни микрочастицы на энергетическом уровне W_2 ,
- г) времени жизни частицы как верхнего W_2 , так и нижнего W_1 уровней

Верно: ...

1.2.3 Естественная ширина линии излучения обычно невелика: для оптических переходов микрочастиц конечная ширина линии может составлять единицы мегагерц. Эта конечная ширина линии...

- а) устранима,
- б) неустранима.

Верно: ...

1.2.4 В квантовой 3-х уровневой энергетической системе микрочастиц совершается процесс спонтанного излучения, в том числе с энергетического уровня W_3 , время жизни на котором τ_3 на энергетический уровень W_2 , где время жизни τ_2 .

1.2.4.1. Какова естественная ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{32}$ квантового перехода с третьего энергетического уровня W_3 на второй W_2 .

1.2.4.2. Чем определяется время жизни микрочастиц?

1 Верно: ...

2 Верно: ...

1.2.5 Уширение естественной ширины спектральной линии может

вызываться различными причинами, в частности, соударениями микрочастиц при их взаимодействии друг с другом, что может привести к изменению времени жизни и ширины спектральной линии.

В газообразной среде, находящейся при низком давлении интервал между возбуждающими соударениями микрочастиц $\tau_{\text{возб}} \gg \tau_0$ – среднего времени жизни микрочастицы находящейся в возбужденном состоянии, при этом ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu \dots$

- а) больше естественной линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu > \Delta\nu_e$),
- б) меньше естественной линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu < \Delta\nu_e$),
- в) равна естественной линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu \cong \Delta\nu_e$),

Верно: ...

1.2.6 В газообразной среде, находящейся при высоком давлении, происходит неупругие соударения микрочастиц, причем $\tau_{\text{возб}} \leq \tau_0, \tau_{\text{гаш}} \leq \tau_0$.

В результате ударного взаимодействия микрочастиц ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{\text{уд}}$ окажется...

- а) больше естественной ширины линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu_{\text{уд}} > \Delta\nu_e$),
- б) меньше естественной ширины линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu_{\text{уд}} < \Delta\nu_e$),
- в) равна естественной ширины линии $\Delta\nu_e$ ($\Delta\nu_{\text{уд}} = \Delta\nu_e$),

Верно: ...

1.2.7 В газообразной среде, находящейся при высоком давлении, ширина спектральной линии, обусловленная ударным столкновением микрочастиц $\Delta\nu_{\text{уд}}$.

При дальнейшем увеличении давления газа ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{\text{уд}}$...

- а) увеличивается,
- б) уменьшается,
- в) не изменяется.

Верно: ...

1.2.8 В газообразной среде, находящейся при высоком давлении, ширина спектральной линии, обусловленная ударным столкновением микрочастиц $\Delta\nu_{\text{уд}}$.

При увеличении температуры газовой среды ширина спектральной

линии излучения $\Delta\nu_{\text{уд}}$...

- а) увеличивается,
- б) уменьшается,
- в) не изменяется.

Верно: ...

1.2.9 В газообразной среде, находящейся при высоком давлении, ширина спектральной линии, обусловленная ударным столкновением микрочастиц $\Delta\nu_{\text{уд}}$. В результате упругого ударного взаимодействия микрочастиц ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{\text{уд}}$ окажется...

- а) больше естественной ширины линии $\Delta\nu_e$,
- б) меньше естественной ширины линии $\Delta\nu_e$,
- в) равной естественной ширины линии $\Delta\nu_e$,

Верно: ...

1.2.10 В квантовых системах источниками излучения являются микрочастицы (атомы или молекулы). В газообразной среде при термодинамическом равновесии микрочастицы непрерывно и хаотически перемещаются в различных направлениях со случайными скоростями, что связано с тепловым движением и эффектом Доплера.

Наблюдаемая ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{\text{д}}$ по сравнению с естественной линией $\Delta\nu_e$...

- а) увеличивается ($\Delta\nu_{\text{д}} > \Delta\nu_e$),
- б) уменьшается ($\Delta\nu_{\text{д}} < \Delta\nu_e$),
- в) оказывается одинаковой ($\Delta\nu_{\text{д}} = \Delta\nu_e$)?

Верно: ...

1.3 Возможность усиления электромагнитного поля в квантовых системах.

1.3.1 При взаимодействии поля (внешняя сила) с одиночной микрочастицей вещества (которую можно уподобить осциллятору – колебательной системе) возможны различные энергетические соотношения и направления обмена энергии. Возможен переход энергии от внешнего поля к осциллятору и возможен другой случай, когда внешнее поле получит энергию от осциллятора и будет усилено.

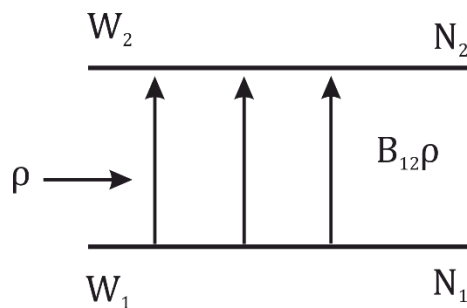
В каждом из этих случаев направление обмена энергией зависит от...

- а) силы внешнего поля,

- б) параметров осциллятора,
- в) длительности процесса взаимодействия,
- г) фазовых соотношений?

Верно: ...

1.3.2 На вещество с двухуровневой энергетической системой W_2 и W_1



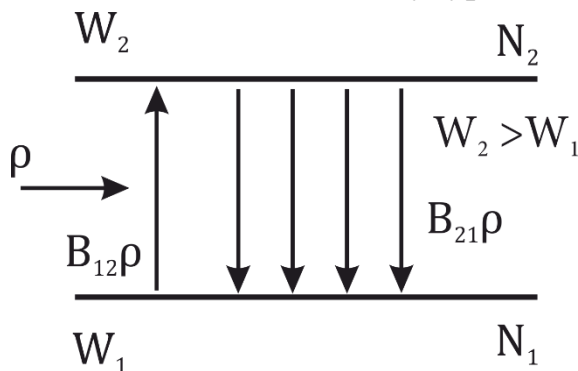
($W_2 > W_1$) и соответствующей населенностью микрочастиц на каждом уровне N_2 и N_1 воздействует внешнее поле с объемной плотностью ρ (см. рис.), которое вызывает индуцированные переходы указанного направления с коэффициентом Эйнштейна B_{12} .

В результате взаимодействия внешнего поля и вещества возникает процесс...

- а) поглощения энергии мощностью $P_{\text{погл}}$,
- б) излучение энергии мощностью $P_{\text{изл}}$.

Верно: ...

1.3.3 На вещество с двухуровневой энергетической системой W_2 и W_1



($W_2 > W_1$) и соответствующими населенностями микрочастиц на каждом уровне N_2 и N_1 воздействует внешнее поле с объемной плотностью ρ (см. рис.), которое вызывает индуцированные переходы указанного направления с коэффициентом Эйнштейна B_{21} .

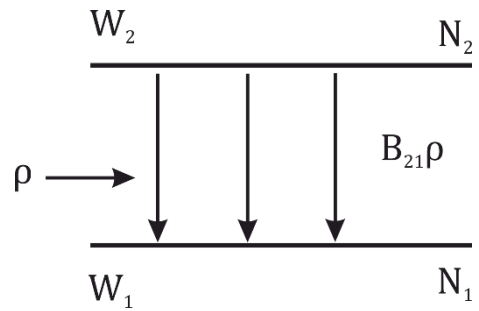
В результате взаимодействия внешнего поля и вещества возникает процесс...

- а) поглощения энергии мощностью $P_{\text{погл}}$,
- б) излучения энергии мощностью $P_{\text{изл}}$.

Верно: ...

1.3.4 Внешнее поле, взаимодействуя с веществом, может индуцировать квантовые переходы, происходящие как сверху вниз, так и снизу вверх. В первом случае происходит излучение энергии и усиление электромагнитного поля, во втором – поглощение энергии поля

веществом. Процессы сопровождающиеся поглощением и выделением энергии, происходят одновременно и показаны на рис. Наиболее интересный случай, когда вещество отдает внутреннюю энергию электромагнитному полю, усиливая его; что является необходимым условием создания такой усиленной среды...



- а) населенность энергетического уровня $N_1 > N_2$,
- б) $N_2 = N_1$ – равенство населенности соответствующих уровней энергии W_2 и W_1 ,
- в) населенность энергетического уровня $N_2 > N_1$?

Верно: ...

1.3.5 В обычных природных условиях вещество, находящегося в состоянии термодинамического равновесия и взаимодействующее с внешним полем в большей степени...

- а) поглощает электромагнитную энергию или
- б) излучает электромагнитную энергию?

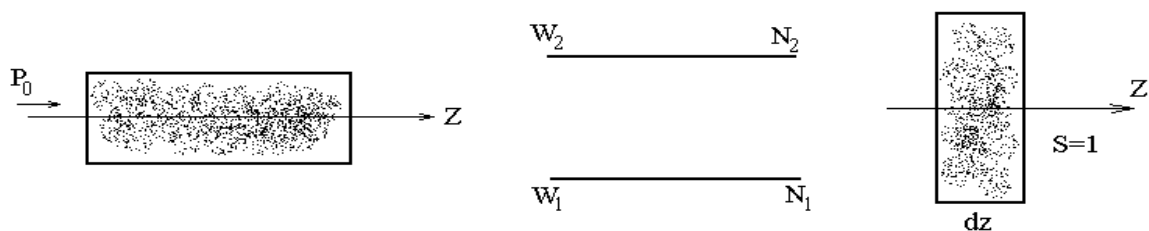
Верно: ...

1.3.6 В квантовых системах вещества в состоянии термодинамического равновесия и отсутствия поля, распределение населенности микрочастиц подчиняется...

- а) закону Ферми-Дирака,
- б) закону Максвелла,
- в) закону Больцмана,
- г) закону Бозе-Эйнштейна.

Верно: ...

1.3.7 На рисунке изображено вещество, на вход которого воздействует внешнее поле с мощностью P_0 . Это поле, проникая внутрь структуры вещества, движется с групповой скоростью $V_{гр}$ в направлении оси Z , с частотой $\nu = \nu_0$, где ν_0 – частота квантового перехода внутри вещества между его энергетическими уровнями W_2 и W_1 , с соответствующими населенностями уровней микрочастицами вещества N_2 и N_1 .



Определить величину мощности $P(z)$ этого излучения в некотором сечении z внутри вещества.

Верно: ...

1.3.8 Затухание внешнего поля, проникающего во внутреннюю структуру вещества происходит по ...

- а) линейному закону,
- б) нелинейному закону,
- в) экспоненциальному закону изменения интенсивности.

Верно: ...

1.3.9 Знак показателя поглощения α в законе Бугера имеет важное значение и свидетельствует о состоянии вещества, его квантовой системы. Равновесное состояние вещества соответствует показателю поглощения и его значению ...

- а) $\alpha > 0$,
- б) $\alpha = 0$,
- в) $\alpha < 0$.

Верно: ...

1.3.10 Абсолютное значение показателя поглощения α определяется объемной плотностью электромагнитного поля ρ . При увеличении входного воздействия на вещество показатель поглощения α ...

- а) увеличивается,
- б) уменьшается,
- в) не изменяется?

Верно: ...

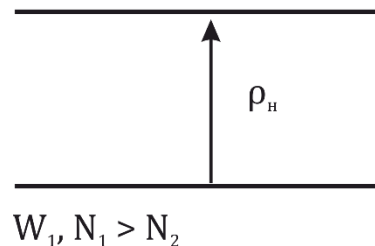
1.3.11 Абсолютное значение показателя поглощения α зависит от групповой скорости $V_{гр}$. При уменьшении групповой скорости $V_{гр}$ показатель поглощения энергии α ...

- а) увеличивается,

- б) уменьшается,
- в) не изменяется?

Верно: ...

1.3.12 В квантовой энергетической двухуровневой ($W_1, W_2, W_2 > W_1$) системе с населенностями микрочастиц на $W_2, N_2 < N_1$ уровнях N_1, N_2 соответственно, осуществляется накачка электромагнитным полем. Возможно ли при этом обеспечить создание в квантовой системе состояния микрочастиц с инверсной населенностью? ...



- а) невозможно; почему?
- б) возможно; почему?

Верно: ...

Раздел 2. Контрольные вопросы к разделу «Квантовые приборы»

2.1 Оптические квантовые генераторы

2.1.1 Выходное электромагнитное излучение лазера является...

- а) когерентным,
- б) некогерентным.

Верно: ...

2.1.2 Имеются два источника (№1 и №2) электромагнитного излучения, свет от которых падает на экраны. На одном из экранов наблюдается засветка в виде размытого пятна источника №1, а на другом экране от источника №2 наблюдается картина интерференции. Какой источник излучения является когерентным...

- а) №1,
- б) №2.

Верно: ...

2.1.3 Излучение лазера является...

- а) монохроматическим,
- б) полихроматическим.

Верно: ...

2.1.4 Излучение лазера является...

- а) ненаправленным,
- б) узконаправленным.

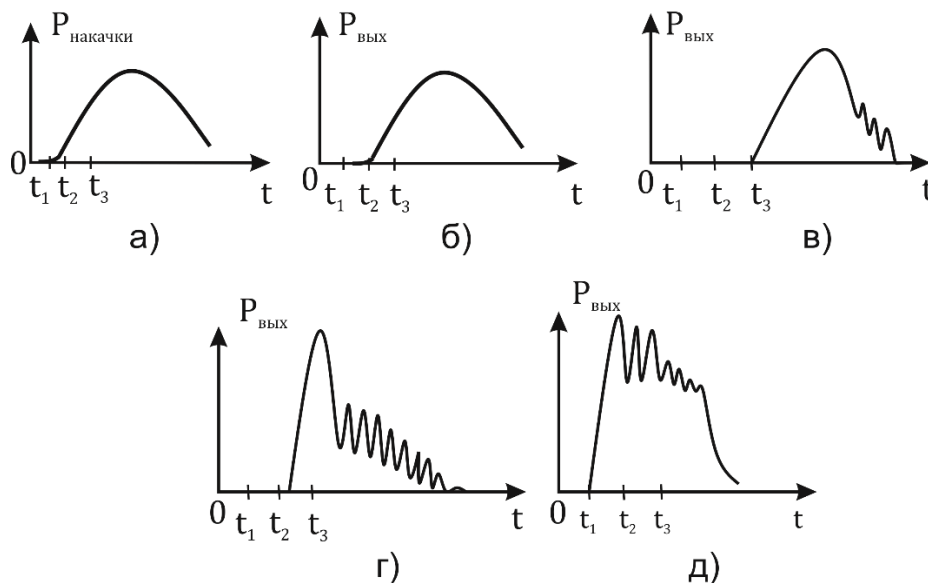
Верно: ...

2.1.5 Излучение лазера является

- а) когерентным только во времени,
- б) некогерентным во времени,
- в) когерентным только в пространстве,
- г) некогерентным в пространстве,
- д) некогерентным во времени и пространстве,
- е) когерентным во времени и когерентным в пространстве.

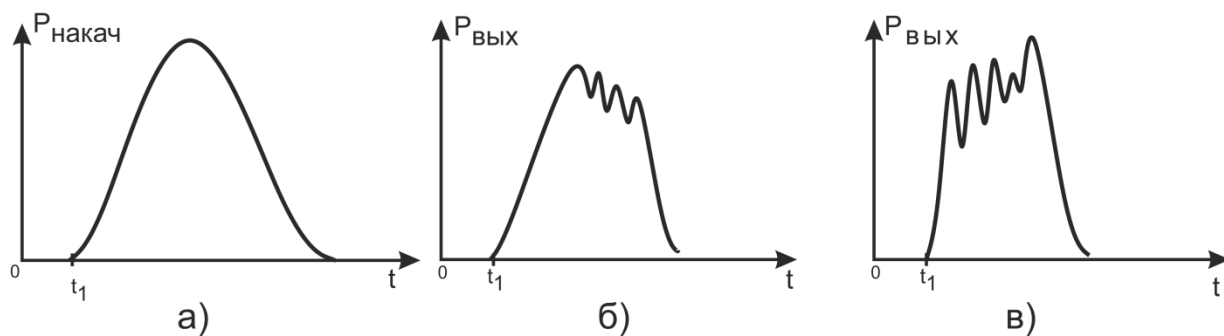
Верно: ...

2.1.6 В большинстве случаев оптический квантовый генератор (ОКГ) на рубине работает в импульсном режиме. Какова форма импульса излучения ОКГ на рубине, если в трехуровневой энергетической системе накачка действует между 1ым и 3им уровнями (Переход между 3им и 2ым уровнями отсутствует) ...



Верно: ...

2.1.7 Оптический квантовый генератор на рубине работает в импульсном режиме. Какова форма импульса излучения $P_{\text{вых}}$ ОКГ на рубине весьма высокой мощности накачки ...



Верно: ...

2.1.8 В ОКГ плоские параллельные зеркала, образующие открытый резонатор, выполняют важную роль – создают ...

- а) отрицательную обратную связь,
- б) положительную обратную связь.

Верно: ...

2.1.9 Важнейшей характеристикой ОКГ на твердотельных кристаллах является коэффициент полезного действия, который принимает значение в

- а) Несколько процентов ($\text{КПД} < 10\%$),
- б) Несколько десятков процентов ($\text{КПД} \sim (60...70) \%$),
- в) $10\% < \text{КПД} < 80 \%$.

Верно: ...

2.1.10 В ОКГ индуцированное световое излучение преобладает над спонтанным при выполнении совокупных условий ...

- а) населенность частиц N_2 уровня W_2 должна быть больше населенности N_1 уровня W_1 ($N_2 > N_1$),
- б) процесс излучения должен превалировать над процессом поглощения,
- в) плотность индуцированного электромагнитного поля ($\rho_n B_{21}$) должна быть значительно больше спонтанного излучения (A_{21}) между 2ым и 1ым уровнями,
- г) коэффициенты Эйнштейна для оптического излучения $A_{32}=A_{21}$.

Верно: ...

2.1.11 Поляризация излучения ОКГ на рубине ...

- а) зависит от взаимного расположения оптической оси интерферометра и главных осей кристалла,

- б) не зависит от взаимного расположения оптической оси интерферометра и главных осей кристалла.

Верно: ...

2.1.12 Принцип усиления ОКГ в среде с инверсной населенностью включает совокупность условий ...

- а) Коэффициент поглощения $\alpha > 0$,
б) Коэффициент поглощения $\alpha < 0$,
в) Число вынужденных переходов в единицу времени в единице объема $n_{21}(N_2)$ должно быть меньше числа встречных переходов n_{21} ($n_{21} < n_{12}$),
г) $\frac{N_2}{N_1} > 1$.

Верно: ...

2.1.13 Выходная мощность рубинового лазера зависит (или не зависит) от ...

- а) энергия накачки ρ_n ,
б) не зависит от энергии накачки ρ_n ,
в) связи резонатора с нагрузкой посредством полупрозрачного зеркала с коэффициентом отражения $\Gamma_2 < 1$,
г) не зависит от связи резонатора с нагрузкой через коэффициент отражения Γ_2 ,
д) отрицательного показателя поглощения α (показатель усиления активной среды),
е) не зависит от отрицательного показателя поглощения α ,
ж) от длины кристалла L ,
з) не зависит от длины кристалла L .

Верно: ...

2.1.14 В рубиновом ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{+++}$) лазере, имеющем систему трех энергетических уровней, состояние с инверсной населенностью обеспечивается соотношением времени жизни τ ионов хрома на втором τ_2 и третьем τ_3 энергетических уровнях при ...

- а) $\tau_2 = \tau_3$,
б) $\tau_2 > \tau_3$,
в) $\tau_2 < \tau_3$,

Верно: ...

2.1.15 Определите путем выбора совокупность условий (баланс фаз и баланс амплитуд) необходимых для самовозбуждения ОКГ ...

Баланс фаз:

$\angle \varphi = (\angle \varphi_K + \angle \varphi_\beta)$ – сумма фазовых сдвигов должна быть ...

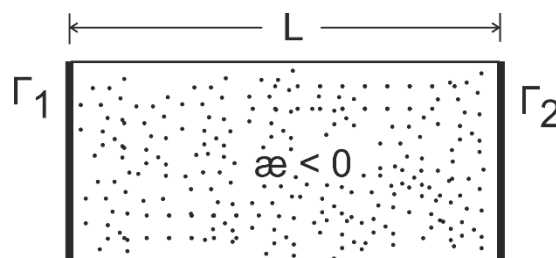
а) $\angle \varphi = 2\pi n$,

б) $\angle \varphi > \frac{2}{3}\pi n$,

в) $\angle \varphi < 2\pi n$,

г) $\angle \varphi < \frac{2}{3}\pi n$,

д) $\angle \varphi = \frac{2}{3}\pi n$.



Верно: ...

Баланс амплитуд:

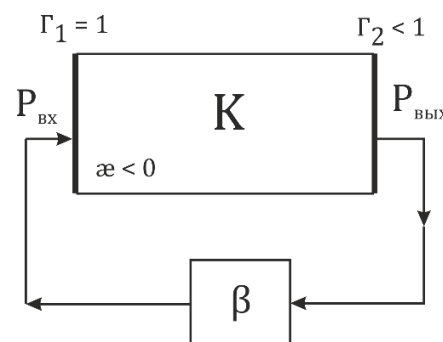
е) $\dot{K}\dot{\beta} > 1$,

ж) $\dot{K}\dot{\beta} < 1$,

з) $|K| = e^{-\alpha 2L}$,

и) $|\beta| = \Gamma_1^2 \cdot \Gamma_2^2$,

к) $|\beta| = \frac{\Gamma_1^2}{\Gamma_2^2}$.



Верно: ...

2.1.16 Возможно ли создать активную среду и получить усиление ($N_2 > N_1$) в рубиновом кристалле путем его нагревания...

а) невозможно,

б) возможно.

Верно: ...

2.1.17 Пользуясь условием баланса мощностей, определите минимальную длину $L_{\min}$ кристалла в ОКГ на рубине, при которой еще возможно существование колебаний в системе ...

$\Gamma_1^2 \Gamma_2^2 \exp(\alpha 2L) \geq 1$, где

Γ_1^2 и Γ_2^2 – коэффициенты отражения первого и второго зеркала

α – показатель отрицательного поглощения на частоте генерации

L – длина активной среды.

Верно: ...

2.1.18 В оптическом квантовом генераторе на смеси гелия и неона (He-Ne) для получения активной среды наиболее широко используется ...

- а) электронное возбуждение рабочих атомов в разряде,
- б) лампа-вспышка.

Верно: ...

2.1.19 В газовых квантовых генераторах для создания рабочей среды применение оптической накачки

- а) целесообразно,
- б) нецелесообразно.

Верно: ...

2.1.20 В газовых лазерах состояние с инверсной населенностью получают посредством...

- а) оптической накачки от твердотельного ОКГ,
- б) лампы-вспышки,
- в) газосветной лампы с узким спектром излучения,

Верно: ...

2.1.21 В оптическом квантовом генераторе на смеси гелия и неона (He-Ne) для возбуждения газовой среды наличие катода ...

- а) совершенно обязательно,
- б) не обязательно.

Верно: ...

2.1.22 В квантовом генераторе на смеси гелия и неона (He-Ne) какой из газов является «рабочим телом-средой», а какой газ является своеобразным «накопителем» населенности...

- а) гелий – «рабочая среда»,
- б) гелий – «накопитель»,
- в) неон – «рабочая среда»,
- г) неон – «накопитель».

Верно: ...

2.1.23 В квантовом генераторе на смеси гелия и неона (He-Ne) наличие зеркал ...

- а) обязательно и необходимо,
- б) не обязательно.

Верно: ...

2.1.24 В газовом ОКГ расстояние по частоте ν между колебаниями для аксиальных мод определяется ...

- а) длиной интерферометра L ,
- б) коэффициентом преломления среды n ,
- в) коэффициентом отрицательного поглощения активной среды α .

Верно: ...

2.1.25 В 3-х уровневом оптическом квантовом генераторе естественная ширина линии излучения определяется ...

- а) средним временем жизни частицы, находящиеся в возбужденном состоянии,
- б) вероятностями переходов с соответствующих энергетических уровней,
- в) площадью зеркал.

Верно: ...

2.1.26 Изменяется ли доплеровская ширина спектра под влиянием температуры?

- а) изменяется,
- б) не изменяется.

Верно: ...

2.1.27 Доплеровская ширина спектра $\Delta\nu_d$ определяется ...

- а) эффектом Доплера,
- б) центральной частотой перехода ν_0 ,
- в) массой частиц M ,
- г) температурой T ,
- д) способом накачки.

Верно: ...

2.1.28 Выходная мощность газового оптического квантового генератора определяется ...

- а) током разряда,
- б) общим давлением газовой смеси,
- в) соотношением парциальных давлений гелия и неона,
- г) диаметром разрядной трубки,
- д) упругими соударениями свободных электронов с невозбужденными атомами.

Верно: ...

2.1.29 В оптических резонаторах с плоскими зеркалами возникают колебания (моды) различных типов. Перечислите 3 основных типа нормальных колебаний в ОКГ

- а) колебания типа,
- б) колебания типа,
- в) колебания типа.

Верно: ...

2.1.30 В оптическом квантовом генераторе для уменьшения угла расходимости лазера необходимо ...

- а) уменьшить потери на косых модах,
- б) увеличить потери на косых модах,
- в) уменьшить длину интерферометра,
- г) увеличить длину интерферометра.

Верно: ...

2.1.31 Позволяет ли ОКГ с интерферометром, образованным плоскими прямоугольными зеркалами, наблюдать дифракционную картину излучения?

- а) позволяет,
- б) не позволяет.

Верно: ...

2.1.32 При усилении электромагнитного поля в квантовой системе с инверсной населенностью показатель поглощения α (в законе Бугера) принимает значение...

- а) $\alpha < 0$,
- б) $\alpha = 0$,
- в) $\alpha > 0$.

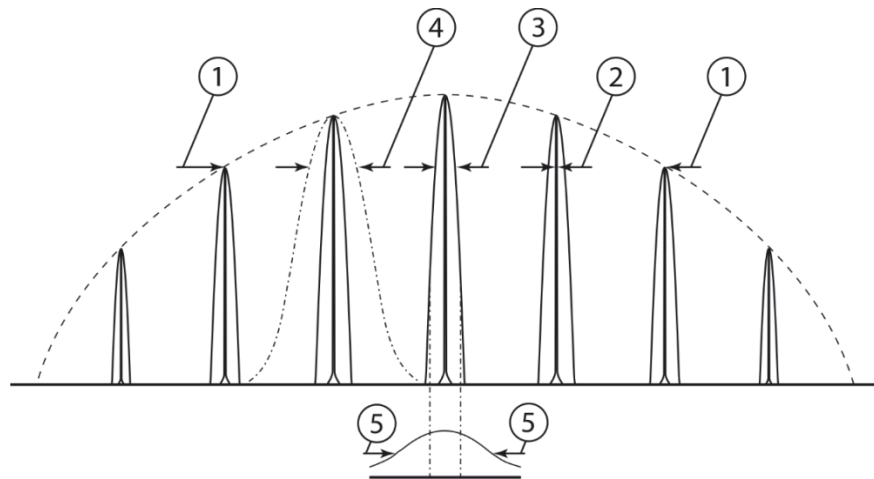
Верно: ...

2.1.33 В ОКГ используются газоразрядные трубки, оптические окна которых размещаются под углом Брюстера. Такая конструкция лазера ...

- а) обеспечивает поляризацию выходного излучения,
- б) не обеспечивает поляризацию излучения.

Верно: ...

2.1.34 На изображенном спектре лазерного излучения укажите уширение $\Delta\nu$ и название пронумерованных спектральных линий ...



- а) 1
- б) 2
- в) 3
- г) 4
- д) 5

Верно: ...

2.1.35 В лазерах обычно генерируется ...

- а) только одна мода,
- б) несколько близко расположенных мод.

Верно: ...

2.1.36 В резонаторах лазеров наблюдается...

- а) большая плотность резонансных частот собственных колебаний,
- б) малая плотность резонансных частот собственных колебаний.

Верно: ...

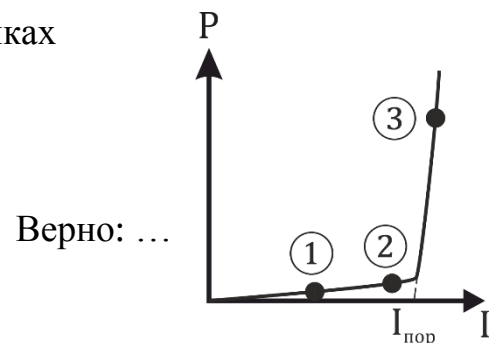
2.1.37 Использование лазера на $p-n$ -переходе в качестве накачки твердотельных, газовых и жидкостных лазеров ...

- а) целесообразно
- б) не целесообразно.

Верно: ...

2.1.38 На энергетической характеристике инжекционного диода назовите режимы работы в пронумерованных точках

- а) точка 1,
- б) точка 2,
- в) точка 3.



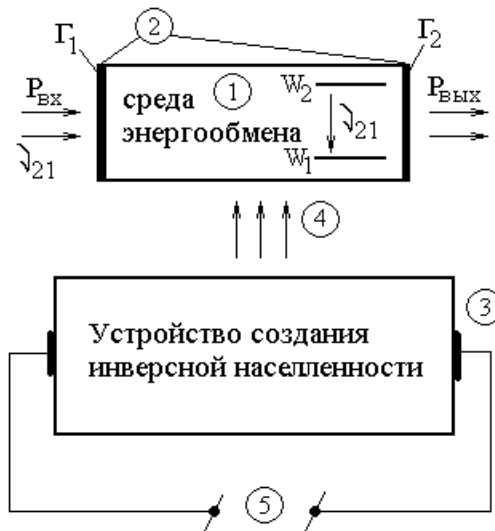
Верно: ...

2.2 Условия возбуждения квантовых генераторов

2.2.1 На приведенном рисунке, показана блок-схема оптического квантового прибора, предназначенного для...

- а) генерации оптических колебаний,
- б) усиления оптических колебаний.

Верно: ...



Назовите элементы (1...5), указанные на схеме.

2.2.2 На приведенном рисунке показана блок-схема оптического квантового прибора, предназначенного для ...

- а) усиления оптических колебаний,
- б) генерации оптических колебаний.

Верно: ...



2.2.3 Открытый оптический резонатор (интерферометр Фабри-Перо)

обладает основными особенностями, к которым относятся следующие обстоятельства...

- а) наличие геометрических размеров резонатора, значительно превышающих длину волны,
- б) наличие сопоставимых геометрических размеров колебательной системы с длиной волны,
- в) наличие в резонаторе ограничивающих боковых поверхностей – пластин,
- г) наличие только двух параллельных стенок – пластин.

Верно: ...

2.2.4 Назовите три наиболее важные задачи, которые выполняет открытый оптический резонатор в ОКГ...

- а) концентрирует электромагнитную энергию требуемой частоты для обеспечения большого времени взаимодействия с возбужденными микрочастицами активного вещества,
- б) обеспечивает многократное отражение электромагнитной волны, благодаря чему достигается требуемый коэффициент положительной обратной связи, необходимой для инерции,
- в) обеспечивает очень острый резонанс при генерировании колебаний,
- г) обеспечивает юстировку зеркал,
- д) не допускает падения выходной мощности...

Верно: ...

2.2.5 В открытом оптическом квантовом резонаторе ОКУ, образованном системой из двух параллельных зеркальных пластин образуется электромагнитное поле стоячих волн. Что приводит к образованию стоячих волн...

- а) активное вещество, находящиеся в резонаторе,
- б) среда энергообмена,
- в) источник питания,
- г) устройство создания инверсной населенностью,
- д) отражение от зеркальных пластин.

Верно: ...

2.2.6 Примечательной особенностью работы ОКУ является возникновение большого числа видов колебаний (продольные моды,

поперечные моды, ТЕМ), причиной которых является...

- а) конструкция и геометрия открытого резонатора,
- б) источник возбуждения,
- в) источник питания.

Верно: ...

2.3 Светодиоды

2.3.1 Укажите какая длина волны λ соответствует видимой области света:

- а) 0,1 мкм,
- б) 0,5 мкм,
- в) 1 мкм,
- г) 2 мкм.

Верно: ...

2.3.2 Излучение светодиода является...

- а) индуцированным,
- б) спонтанным.

Верно: ...

2.3.3 Излучение светодиода является...

- а) когерентным
- б) не когерентным

Верно: ...

2.3.4 От чего зависит частота излучения светодиода:

- а) напряжения,
- б) прямого тока,
- в) ширины запрещенной зоны,
- г) обратного напряжения.

Верно: ...

2.4 Фотоприемные устройства

2.4.1 Каким образом используется закон Бугера в оптоэлектронике:

- а) позволяет рассчитывать числовую апертуру,
- б) позволяет рассчитывать фоточувствительность фотоприемника,
- в) позволяет оценить степень поглощения света в твердом теле,

г) позволяет определить граничную длину волны фотоприемника.

Верно: ...

2.4.2 Что называется *p-i-n* фотодиодом:

- а) прибор, использующий *i*-область с высоким удельным сопротивлением, заключенную между областями противоположного типа электропроводности,
- б) прибор, использующий *i*-область с низким удельным сопротивлением, заключенную между областями противоположного типа электропроводности,
- в) прибор, использующий *i*-область с высоким удельным сопротивлением, заключенную между областями одного типа электропроводности с низкой степенью легирования,
- г) прибор, использующий *i*-область с низким удельным сопротивлением, заключенную между областями одного типа электропроводности с высокой степенью легирования.

Верно: ...

2.4.3 Что называется фотодиодом с барьером Шоттки:

- а) прибор, использующий слой с собственной проводимостью,
- б) прибор, использующий внутри структуры металлический слой,
- в) прибор, использующий внутри структуры гетеропереход,
- г) прибор, использующий внутри структуры слой с малым сопротивлением.

Верно: ...

2.4.4 Что называется гетерофотодиодом:

- а) прибор, использующий контакт металл-полупроводник,
- б) прибор, использующий слой с высокой проводимостью,
- в) прибор, использующий слой с низкой проводимостью,
- г) прибор, использующий полупроводниковые материалы с различной шириной запрещенной зоны

Верно: ...

2.4.5 Какой из режимов работы обеспечивает большее быстродействие и высокую чувствительность фотодиодов:

- а) с лавинным пробоем, с тепловым пробоем,

- б) с лавинным пробоем, без теплового пробоя,
- в) с тепловым пробоем, без лавинного пробоя,
- г) без теплового пробоя, без лавинного пробоя

Верно: ...

2.4.6 Сколько электронно-дырочных переходов имеет фототранзистор:

- а) один переход,
- б) два перехода,
- в) три перехода,
- г) не имеет переходов.

Верно: ...

2.4.7 За счет чего увеличивается чувствительность фототранзистора по сравнению с фотодиодом:

- а) фотогенерация носителей в фототранзисторе приводит к уменьшению сопротивления всех трех областей прибора, тогда как в фотодиоде изменяется сопротивление только двух имеющихся областей,
- б) фотогенерация носителей фототранзисторе сопровождается дополнительной инжекцией носителей в базу,
- в) фотогенерация носителей фототранзисторе сопровождается дополнительной экстракцией носителей из базы.

Верно: ...

2.4.8 Какая из областей транзистора (эмиттер, база или коллектор) должна освещаться светом, чтобы изменялся ток через фототранзистор:

- а) при освещении любой из областей, если их толщина меньше диффузионной длины носителей,
- б) только при освещении базы,
- в) только при освещении эмиттера и коллектора.

Верно: ...

2.5 Фоторезисторы

2.5.1 Принцип действия фоторезисторов основан:

- а) на изменении концентрации носителей заряда в полупроводнике, и, следовательно, его электропроводности при облучении

- световым потоком,
- б) на изменении интенсивности лавинных явлений в полупроводнике при облучении его световым потоком,
 - в) на изменении концентрации примесей в объеме полупроводника при воздействии на него световым потоком?

Верно: ...

2.6 Оптроны

2.6.1 Что называется оптроном:

- а) прибор, использующий преобразование электрической энергии в оптическую,
- б) прибор, использующий преобразование оптической энергии в электрическую,
- в) прибор, использующий преобразование электрической энергии в оптическую и оптической энергии в электрическую,
- г) прибор, использующий излучатель и фотоприемник не связанные между собой?

Верно: ...

2.6.2 Какие известные оптроны могут обладать коэффициентом передачи превышающим единицу:

- а) диодные,
- б) диодно-резисторные,
- в) диодно-транзисторные,
- г) тиристорные.

Верно: ...

ЧАСТЬ II. ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

Раздел 1. Ответы на контрольные вопросы раздела 1 «Физические основы квантовой электроники»

1.1 Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов

1.1.1 В квантовых приборах рабочей средой (рабочим телом) являются микрочастицы вещества (атомы и молекулы), которые, взаимодействуя между собой, отдают полю свою потенциальную энергию. Эта особенность квантовых приборов является их существенным отличием от электронных приборов.

1.1.2 Усиление энергии высокочастотного электромагнитного поля осуществляется за счёт внутренней энергии вещества. Избыточная энергия приобретает микрочастицами от дополнительного источника.

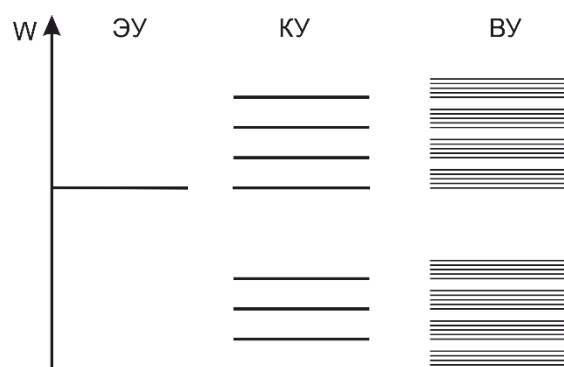
1.1.3 Свойства всей квантовой системы и отдельных ее частей зависят от взаимного движения, связей и характера взаимодействия элементов этой системы. В микромире при движении и взаимодействии микрочастиц действуют особые законы. Движение микрочастиц подчиняется законам квантовой механики. Многие из хорошо известных нам законов классической физики здесь неприменимы.

1.1.4 В соответствии с законами квантовой механики внутренняя энергия изолированной микрочастицы может принимать лишь дискретные значения, называемые уровнями энергии. Совокупность различных разрешённых значений внутренней энергии микрочастицы определяет систему энергетических уровней, показанную на диаграмме энергетических уровней (состояний) молекулы.

Диаграмма энергетических уровней молекул имеет значительно более сложный вид, чем у атомов. Энергетические состояния молекул определяются наряду с движением электронов, как это имеет место в атомах, также колебательным (периодическим изменением относительно расположения ядер атомов, входящих в состав молекул) и вращательным (периодическим изменением ориентации молекул как целого в пространстве) движением молекул. Энергия молекулы W может быть представлена суммой энергий электронного ($W_{эу}$), колебательного ($W_{ку}$) и вращательного ($W_{ву}$) движения в молекуле:

$$W = W_{\text{ЭУ}} + W_{\text{КУ}} + W_{\text{ВУ}}.$$

Диаграмма энергетических уровней (состояний) молекулы

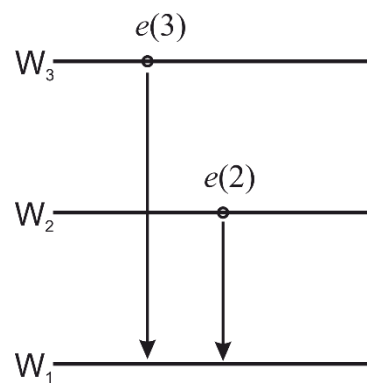


Диапазоны частот излучения:

$10^{14} \dots 10^{15}$ Гц; $10^{13} \dots 10^{12}$ Гц; $10^{12} \dots 10^{10}$ Гц

(Ультрафиолетовый и видимый) (Инфракрасный) (Далекий инфракрасный (до сантиметров))

1.1.5 Между микрочастицами, находящимися в различных энергетических состояниях возможны квантовые переходы. При переходе из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией происходит выделение энергии, в частности, в виде фотона излучения. Если излучательный переход произошел самопроизвольно сверху вниз, то такой квантовый переход называется спонтанным.



Фотоны, энергия которых определяется однозначно частотой излучения, являются частицами материи, обладающими не только энергией $h\nu$ (сгусток энергии), но и импульсом (количеством движения) $p = \frac{W}{c}$, где c – скорость света в вакууме, причем направление импульса совпадает с направлением излучения.

1.1.6 Населенность уровня N_i – число микрочастиц с данной энергией в единице объема. Обозначим вероятность спонтанного перехода в единицу времени через коэффициент Эйнштейна A . Тогда населенность верхнего уровня, с которого происходит спонтанный переход будет уменьшаться в соответствии с выражением

$$N_i = N_{i0} \cdot \exp(-At),$$

Где N_{i0} – насыщенность уровня i в момент времени t_0 .

1.1.7 Прежде всего, следует вспомнить определение спонтанного перехода – самопроизвольного квантового перехода микрочастицы с верхнего энергетического уровня в нижнее энергетическое состояние. Поэтому такая постановка вопроса противоречит основному определению спонтанного перехода. Во-вторых, квантовый переход микрочастицы с нижнего энергетического уровня на верхний связан с поглощением энергии стороннего поля, но если его нет, то невозможно и поглощение. Следовательно, поглощение не может быть самопроизвольным, оно непременно вынуждается сторонним полем. Таким образом, спонтанные (самопроизвольные) переходы микрочастицы с нижнего уровня на верхний невозможны в любой квантовой системе. Спонтанные (самопроизвольные) переходы микрочастицы в квантовой системе возможны только при переходе с верхних энергетических уровней на нижние.

1.1.8 Число спонтанных переходов в единицу времени определяется выражением $n_{21} = N_2 A_{21}$.

1.1.9 Мощность спонтанного излучения P_{21} определяется выражением $P_{21} = h\nu_{21} \cdot n_{21} = h\nu_{21} \cdot N_2 A_{21}$

1.1.10

Верно: 1... $N_2 B_{32} \rho = n_{31}$, (излучение)
 2... $N_1 B_{12} \rho = n_{12}$, (поглощение)
 3... $N_3 B_{31} \rho = n_{31}$, (излучение)
 4... $N_1 B_{13} \rho = n_{13}$, (поглощение)
 5... $N_1 B_{12} \rho = n_{12}$, (поглощение)
 6... $N_1 B_{13} \rho = n_{13}$, (поглощение)
 7... $N_2 B_{21} \rho = n_{21}$, (излучение)

1.1.11 Особенность вынужденного излучения состоит в том, что появившийся фотон полностью идентичен фотону внешнего поля. Вынужденное излучение имеет такие же частоту, фазу, направление распространения и поляризацию, как и воздействие внешнего поля. Потому вынужденное (индуцированное) излучение увеличивает энергию электромагнитного поля с частотой перехода ν_{21} . Именно такое взаимодействие внешнего электромагнитного поля с квантовой системой ансамбля микрочастиц служит предпосылкой для создания квантовых усилителей и генераторов.

1.1.12 В исходном термодинамическом состоянии населенность нижнего энергетического уровня N_1 больше населенности верхнего N_2 ($N_1 > N_2$).

При воздействии на квантовую систему электромагнитным полем накачки плотностью ρ_n , с частотой поля накачки $\nu_n = \frac{W_2 - W_1}{h}$, будет происходить поглощение энергии и изменение населенности уровней. В результате встречных квантовых переходов микрочастиц имеет место условие равновесия, при котором $n_{21} = n_{12}$.

Применяя поле накачки, получить в двух уровневой квантовой системе состояние с инверсией населенности $N'_2 > N'_1$ невозможно. Даже при воздействии поля накачки с объемной плотностью $\rho_n \rightarrow \infty$ $N'_2 \rightarrow N'_1$, т. е. при больших уровнях индуцированного поля появляется насыщение перехода, при котором населенности рабочих уровней выравниваются.

Инверсию населенности можно получить под действием поля накачки, но только в многоуровневых квантовых системах. Минимальное число энергетических уровней равно трем.

1.2 Ширина спектральной линии

1.2.1 В реальных квантовых системах микрочастиц, в соответствии с принципом Паули, не может быть больше двух микрочастиц, имеющих одинаковую энергию. Поэтому при образовании ансамбля одинаковых микрочастиц их энергетические уровни расщепляются (на подуровни). Степень размытия энергетических уровней определяется соотношением Гейзенберга, которое можно записать в форме:

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx h,$$

где Δp – неопределенность измерения импульса микрочастицы,

Δx – неопределенность изменения координаты микрочастицы.

Энергетические уровни имеют конечную ширину, связанную с конечным временем жизни микрочастицы τ .

1.2.2 Энергетические уровни W_2 и W_1 не являются бесконечно узкими и определяются соотношением неопределенностей Гейзенберга $\Delta W \cdot \tau \approx h$, где ΔW – неопределенность энергии уровня $W_2, (W_1)$, τ – время жизни частицы на этом уровне, h – постоянная Планка.

$$\Delta \nu \approx \frac{\Delta W}{h} \approx \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}$$

Время жизни частицы обратно пропорционально вероятности спонтанных переходов $\tau = \frac{1}{A}$.

Ширина спектральной линии излучения зависит от времени жизни как верхнего, так и нижнего рабочих уровней.

В идеальном случае, когда на микрочастицу не действуют никакие внешние силы спектральная линия имеет конечную, так называемую естественную ширину.

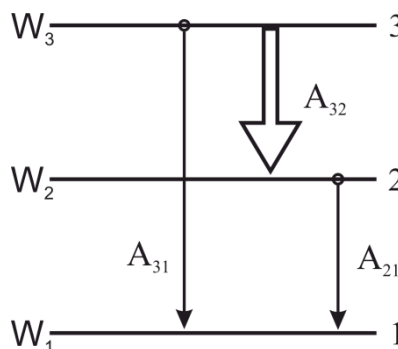
1.2.3 Естественная ширина спектральной линии излучения имеет конечную величину, неустранимую никакими способами. Это уширение линии связано с тем, что сами энергетические уровни не являются бесконечно «узкими» и определяются соотношением Гейзенберга $\Delta W \cdot \tau = h$, где ΔW – неопределенность энергетического уровня W , τ – время жизни микрочастицы на этом уровне, h – постоянная Планка. Чем больше неопределенность энергии уровня ΔW , тем больше естественная ширина спектральной линии.

Естественная ширина спектральной линии излучения, зависящая от времени жизни микрочастицы τ является важнейшей характеристикой вещества. (Естественная ширина спектральной линии излучения физически свидетельствует о свойствах вещества).

1.2.4

1.2.4.1. Изобразим квантовую 3-х уровневую энергетическую систему со спонтанными переходами и соответствующими коэффициентами Эйнштейна. Естественная ширина спектральной линии $\Delta \nu_{32}$

$$\Delta \nu_{32} = \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_2} = \nu_{max} - \nu_{min}$$



1.2.4.2. Время жизни микрочастиц определяется соответствующими вероятностями их переходов на соответствующие энергетические

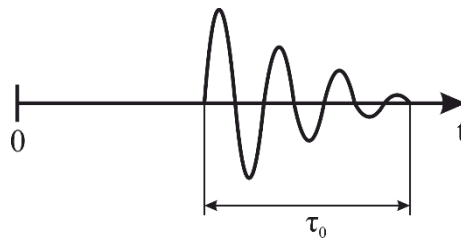
уровни

$$\Delta\nu_{32} = \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_2} = A_{32} + A_{31} + A_{21} .$$

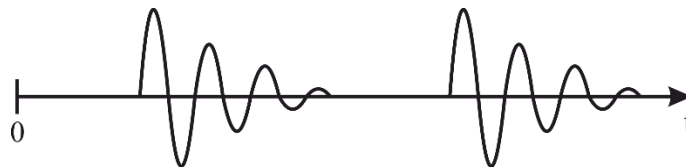
1.2.5 Рассмотрим классическую модель излучателя микрочастицы при неупругом соударении, которое может вызвать возбуждение и гашение колебаний. Процесс излучения после получения энергии носит затухающий характер



Через некоторое время микрочастица вновь получит энергию и вновь ее излучает, при этом $\Delta\nu_e = \frac{1}{\tau_0}$.



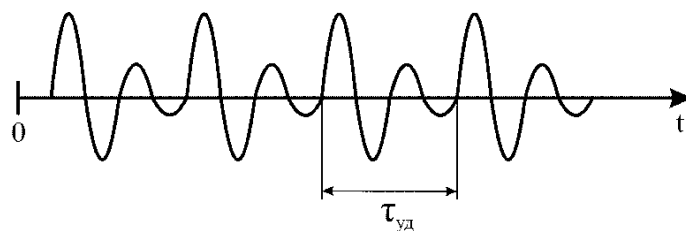
Такие колебания свободно затухают



Ширина спектральной линии соответствует естественной ширине

$$\Delta\nu \approx \Delta\nu_e$$

1.2.6 При больших давлениях газа ширина спектральной линии излучения определяется главным образом столкновением микрочастиц между собой, т.е. временем свободного пробега.



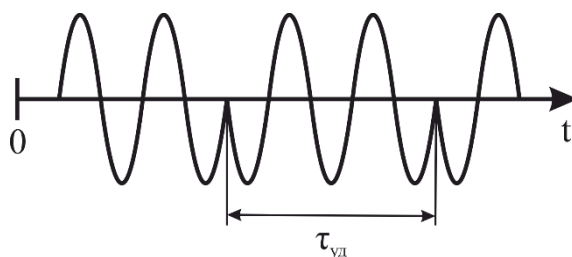
$$\Delta\nu_{уд} > \Delta\nu_e$$

Ударное взаимодействие микрочастиц друг с другом приводит к уменьшению времени жизни микрочастиц в данном состоянии, что увеличивает ширину их энергетических уровней и спектральных линий.

1.2.7 Ширина спектральной линии увеличивается, так как при увеличении давления увеличивается вероятность соударения микрочастиц в газовой среде, уменьшается время жизни микрочастицы ($\Delta\nu_{уд} = \frac{1}{\tau_{уд}}$).

1.2.8 Ширина спектральной линии увеличивается, так как при увеличении температуры увеличивается вероятность соударения микрочастиц в газовой среде, уменьшиться время жизни микрочастиц ($\Delta\nu_{уд} = \frac{1}{\tau_{уд}}$).

1.2.9 При упругом соударении микрочастиц осциллограмма процесса излучения изображена на графике.

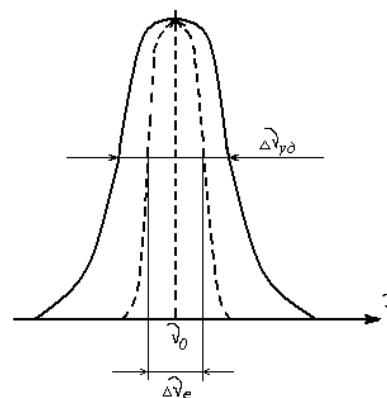


При упругом соударения микрочастиц изменяется фаза и ширина спектральной линии излучения $\Delta\nu_{уд}$ увеличивается, т.е.

$$\Delta\nu_{уд} > \Delta\nu_e$$

Форма спектральной линии за счет соударения описывается кривой Лоренца. Из-за этого ударное уширение спектральной линии иногда называют Лоренцевым.

1.2.10 При влиянии эффекта Доплера на ширину спектральной линии излучения $\Delta\nu_D$ для случая, когда движение излучающей микрочастицы направлено к наблюдателю, последний фиксирует частоту, более высокую, чем истинная частота излучения. При противоположном движении он фиксирует более низкую частоту.



Распределение скоростей микрочастиц (молекул в газе) подчиняется закону Максвелла. Каждое значение скорости определяет свое значение частоты.

Наблюдаемая спектральная линия вещества представляет собой суперпозицию спектральных линий от всех микрочастиц вещества, т.е. линий с различными центральными частотами ν_0 . Для мелких микрочастиц при обычной температуре ширина доплеровской линии ν_D в оптическом диапазоне может превышать естественную ширину линии ν_e на несколько порядков и достигать значения более 1 ГГц. ($\Delta\nu_D \gg \Delta\nu_e$) - Доплеровское уширение.

1.3 Возможность усиления электромагнитного поля в квантовых системах.

1.3.1 Направление обмена энергии зависит от фазовых соотношений между внешним полем и осциллятором – микрочастицей вещества (осциллятор – элемент вещества).

Полезная идея состоит в том, чтобы энергию вещества передать внешнему полю и усилите это поле.

1.3.2 При индуцированных квантовых переходах снизу вверх вещество поглощает энергию и возникает процесс поглощения энергии системой микрочастиц.

1.3.3 При индуцированных квантовых переходах сверху вниз вещество излучает энергию.

1.3.4 Поведение квантовой системы микрочастиц при взаимодействии с внешним полем в целом будет определяться превышением одних видов индуцированных переходов над другими.

1.3.5 Так как в состоянии термодинамического равновесия в квантовой системе обычно на нижнем энергетическом уровне (на основном) находится больше микрочастиц, чем на верхних уровнях, а вероятность переходов микрочастиц с уровня на уровень в любом направлении равны, то число переходов с низшего уровня на высший будет больше, чем с высшего на низший. Этим объясняется тот факт, что в обычных условиях вещества поглощают электромагнитную энергию. Поглощение электромагнитной энергии зависит от интенсивности внешнего поля, т.е. от плотности энергии проходящего

излучения.

1.3.6 Закон Больцмана определяет, скольким микрочастицам (молекулами и ионами) из общего их числа надлежит находиться на каждом из различных энергетических уровнях. Обычно это больцмановское распределение показывает, что в газе при данной температуре каждая микрочастица большую часть своего времени должна проводить в состоянии с меньшей энергией и чем выше энергетический уровень, тем меньше время, в течение которого микрочастица может на нем находиться. Применительно к газу, состоящему из большого числа микрочастиц (атомов, молекул, ионов) можно на основании больцмановского распределения утверждать, что в каждый момент времени на верхних энергетических уровнях будет меньше микрочастиц, чем на нижних, причем чем выше уровень, тем меньше будет микрочастиц с соответствующим уровнем энергии.

Если формально распространить закон Больцмана для случая, когда $N_1 > N_2$, то можно получить значение температуры T. Оно окажется отрицательным:

$$T = - \frac{W_2 - W_1}{k \cdot \ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}$$

1.3.7 Взаимодействие внешнего поля, проникающего внутрь структуры вещества, определяется законом Бугера,

$$P(z) = P_0 \cdot \exp[-(\alpha z)],$$

где $\alpha = \frac{h\nu(N_1 - N_2) \cdot B}{V_{\text{гр}}}$ – коэффициент поглощения.

Полученное соотношение (закон Бугера) определяет характер ослабления мощности излучения внешнего поля P_0 при его прохождении через поглощающую структуру вещества.

1.3.8 Затухание (ослабление) интенсивности $I(z)$ пучка монохроматического света при его прохождении через поглощающее вещество, в соответствии с законом Бугера, происходит по экспоненциальному закону: $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$, где I_0 – интенсивность пучка, падающего на слой вещества, α – показатель поглощения.

1.3.9 Показатель поглощения α зависит от соотношения населенностей микрочастиц N_1 и N_2 на энергетических уровнях квантовой системы

вещества. Действительно, микрочастицы в результате теплового движения занимают большое количество возбужденных уровней, причем, чем ниже по величине энергии уровень, тем больше на нем микрочастиц. Под действием внешнего поля микрочастицы, находящиеся на нижних уровнях N_1 , переходят на верхние уровни, поглощая квант лучистой энергии $h\nu$, а микрочастицы, находящиеся на верхних уровнях N_2 , переходят на нижние, излучая квант энергии $h\nu$ и увеличивая тем самым энергию внешнего поля, воздействующего на вещество. Таким образом, процессы поглощения и излучения энергии света конкурируют между собой. Но так как микрочастиц на нижних уровнях N_1 больше, чем на верхних N_2 , в целом будет преобладать поглощение света. При условии населенности уровней, когда $N_1 > N_2$, показатель поглощения соответствует положительным значениям, то есть $\alpha > 0$.

1.3.10 При увеличении внешнего поля (входного воздействия) с объемной плотностью ρ на вещество, увеличивается число индуцированных квантовых переходов микрочастиц, и показатель поглощения α увеличивается.

1.3.11 Анализируя закон Бугера, и обратив внимание на показатель экспоненты, содержащий α , приходим к заключению, что уменьшение групповой скорости увеличивает объемную плотность поля ρ , что вызовет увеличение числа индуцированных квантовых переходов микрочастиц и показателя поглощения α (уменьшается).

1.3.12 Применяя поле накачки получить в двухуровневой квантовой системе состояние с инверсной населенностью $N_2^1 > N_1^1$ невозможно.

Даже при воздействии поля накачки с объемной плотностью $\rho_n \rightarrow \infty$ $N_2^1 \rightarrow N_1^1$, то есть, при больших уровнях индуцирующего поля появляется насыщение перехода, при котором населенности рабочих уровней сравниваются.

Инверсную населенность можно получить под действием поля накачки, но только в многоуровневых квантовых системах.

Минимальное число энергетических уровней равно трем.

Раздел 2. Ответы на контрольные вопросы «Квантовые приборы»

2.1 Оптические квантовые генераторы

2.1.1 Выходное излучение лазера является когерентным, так как оно представляет два (несколько) колебаний от одного источника с частотой, амплитудой и фазой каждого из них, которые остаются неизменными во времени.

2.1.2 В качестве критерия когерентности колебаний может служить сложение этих колебаний. Сложение колебаний, при котором интенсивность результирующего колебания зависит от разности фаз исходных колебаний, называется интерференцией. Если в результате сложения двух колебаний на экране имеет место чередование темных и светлых концентрических окружностей, т. е. имеет место интерференция, то источник электромагнитного излучения №2 является когерентным.

2.1.3 Высокая монохроматичность лазера обусловлена тем, что стимулированное излучение представляет собой резонансный процесс и в силу этого более строго привязано к центру полосы частот, чем излучение, спонтанное (самопроизвольное, не стимулированное) испускаемое частицей. Излучение всех стимулированных колебаний происходит на одной частоте. На этой же частоте происходит излучение всех последующих возбужденных колебаний. Относительная ширина линии излучения лазеров составляет $10^{-6} \dots 10^{-10}$

2.1.4 В оптическом резонаторе с активным веществом, помещенным между двумя зеркалами, световая волна одиночного фотона, упавшая через одно из зеркал на возбужденное вещество, усиливается за счет электромагнитной энергии тех возбужденных частиц, на которые она упала и которые вследствие этого перешли на нижний энергетический уровень. Значительного усиления достигает волна, которая перемещается перпендикулярно зеркалу и тысячекратно отражаясь, проходит через активное вещество, не отклоняясь при этом слишком далеко от продольной оси резонатора. Теоретическая ширина расходящегося луча определяется отношением $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$,

где d – диаметр торца активного вещества.

Расчеты показывают, что ширина луча составляет 10^{-4} рад

(1 радиан $\approx 57^\circ$), т.е. излучение является узконаправленным.

Излучение имеет большую мощность, так как в индуцированном излучении одновременно участвуют большое число частиц.

2.1.5 Излучение лазера является пространственно когерентным, потому что все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения волн. Это излучение когерентно и во времени, ибо имеется строгое фазовое соответствие между частью волны, испускаемой в один момент времени, и волной, излучаемой спустя некоторый промежуток времени. Чем точнее волна сохраняет заданную частоту, тем более отчетливо проявляется свойство когерентности во времени.

2.1.6 Форма излучаемого импульса имеет сложный характер, поскольку в системе имеют место релаксационные комбинации. Как видно из рисунков излучательный импульс (Γ) представляет собой серию пиков, начиная с момента времени t_2 , при котором выполняется условие $N_2 > N_1$. Характер их нерегулярен и бывает разный у двух идентичных лазеров. Для одномодового режима релаксационные колебания объясняются изменением населенности рабочих уровней в процессе генерации. С началом действия накачки генерации еще нет, так как на создание инверсной населенности требуется конечное время. (до момента времени t_2 $N_2 \leq N_1$). Затем возникает генерация, которая при недостаточной накачке обедняет второй уровень. Колебания затухают. Далее, по мере получения достаточной инверсии между рабочими уровнями, опять возникает генерация. Процесс повторяется.

2.1.7 При значительной мощности накачки процесс начинается с релаксационных колебаний и далее переходит в непрерывную генерацию.

2.1.8 Колебательная система необходима для создания достаточной плотности (ρ) фотонного поля, обеспечивающего преобладание индуцированного излучения над спонтанным. Такой открытый резонатор выполняет три задачи:

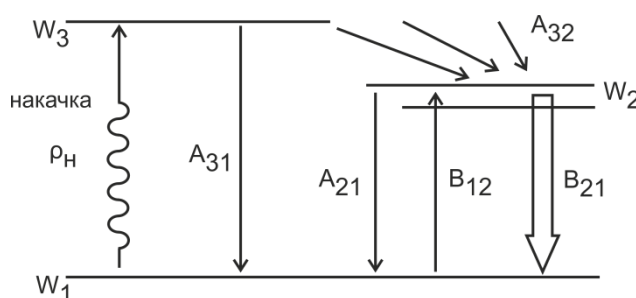
- обеспечивает многократное отражение электромагнитной волны, благодаря чему достигается требуемый коэффициент положительной обратной связи (β)), необходимой для генерации;

- концентрирует электромагнитную энергию требуемой частот, для обеспечения большего времени взаимодействия с возбуждаемыми частицами активного вещества;
- обеспечивает очень острый резонанс при генерировании колебаний.

2.1.9 Оптический квантовый генератор на рубине обеспечивает сравнительно высокие уровни мощности до сотен кВт в импульсе при относительно низких КПД. Низкий КПД в несколько процентов (1...4)% связан с малой эффективностью накачки (потери света, несоответствие спектров излучения и поглощения) и с потерей энергии при безизлучательных переходах, потерями в интерферометре.

2.1.10 Рассмотрим схему энергетических уровней для рубина с примесью хрома.

В данной 3-х уровневой системе накачка действует между 1ым и 3им уровнями. При отсутствии переходов между третьим и вторым уровнями излучательные переходы в системе маловероятны.



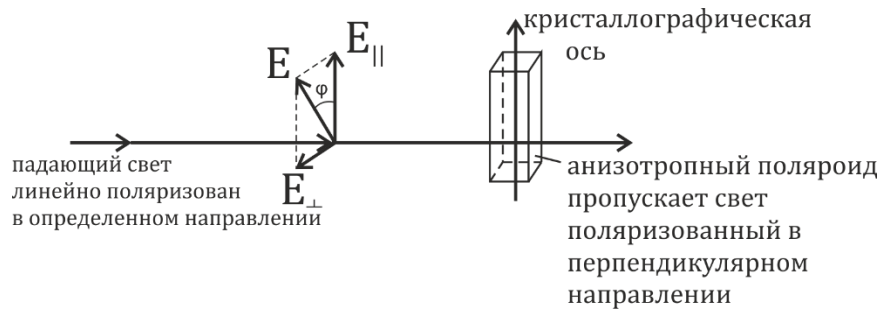
Однако существует большая вероятность безизлучательных переходов, при которых энергия передается кристаллической решетке, вызывая акустические колебания, и далее переходит в тепло. Между вторым и первым уровнями возможны излучательные переходы, в том числе индуцированные. Если населенность второго уровня превысит населенность первого, при выполнении условия баланса мощностей возникает генерация в районе частоты перехода ν_{21} .

Второй уровень раздвоен, поэтому излучение может происходить на двух частотах, соответствующих длинам волн 6943 Å и 6929 Å. Однако в процессе генерации первое колебание подавляет второе и рабочий переход сопровождается красным светом с длиной волны около 0,7 микрон (≈ 6943 Å).

2.1.11 Поляризация выходного излучения зависит от взаимного расположения оптической оси интерферометра и главных осей кристалла. При их совпадении условия самовозбуждения выполняются

для любого вида поляризации. Имеет место, так называемое, поляризационное вырождение колебаний.

В случае несовпадения начинает сказываться анизотропия кристалла, при этом условия самовозбуждения выполняются только для некоторых видов поляризации.



Поляризация света – выделение из естественного света световых колебаний с определенным направлением электрического вектора при помощи поляризации призмы, поляроида.

Естественный свет не поляризован, но пройдя через поляроид становится поляризованным. Если на поляроид падает поляризованный свет и вектор электрического поля E составляет угол φ с кристаллографической осью поляроида, то такую световую волну можно представить в виде суммы двух волн с взаимно перпендикулярными поляризациями: $E_{\parallel} = E \cos \varphi$ и $E_{\perp} = E \sin \varphi$. Через поляризатор пройдет только часть светового пучка, соответствующая компоненте $E_{\parallel}$, энергия которого пропорциональна $\cos^2 \varphi$.

2.1.12 В среде с инверсной населенностью активного вещества ($\alpha < 0$), при объемной плотности энергии число вынужденных переходов в единицу времени в единице объема с выделением энергии $n_{21} = B\rho N_2$, а выделяемая при этих переходах энергия в единице объема и единицы времени, т.е. мощность,

$$P_{\text{выд}} = n_{21} h\nu_{21} = B\rho N_2 h\nu_{21}$$

Аналогично число вынужденных переходов с поглощением энергии и поглощаемая от внешнего поля мощность в единице объема соответственно

$$n_{12} = B\rho N_1 ;$$

$$P_{\text{погл}} = B\rho N_1 h\nu_{21}$$

Изменение мощности электромагнитного поля

$$P = P_{\text{выд}} - P_{\text{погл}} = B\rho h\nu_{21} (N_2 - N_1)$$

Если величина мощности $P > 0$, т.е. выделяемая мощность превышает поглощаемую, то в системе происходит увеличение энергии

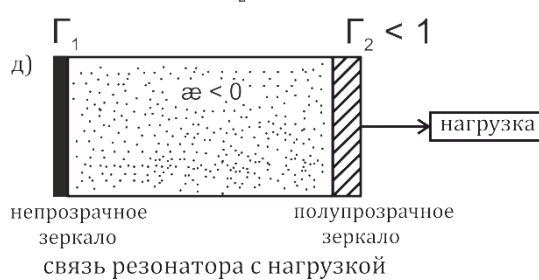
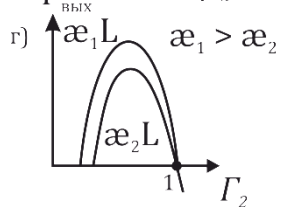
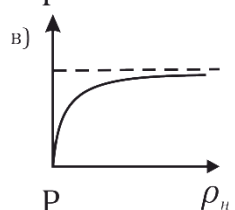
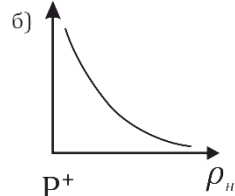
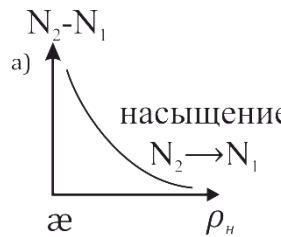
поля или усиление электромагнитного поля. При $P < 0$ преобладает поглощение энергии и энергия внешнего поля убывает.

Таким образом, принцип усиления ($P > 0$) заключается в совокупности условий:

$$\text{б) } \alpha < 0$$

$$\text{г) } \frac{N_2}{N_1} > 1$$

2.1.13 В процессе работы квантового генератора освобождается энергия



поглощения α от

представлена на графиках б) и в).
Активная среда отдает максимальную мощность при вполне определенной связи резонатора с нагрузкой. Связь с нагрузкой осуществляется через полупрозрачное зеркало интерферометра с

активной среды, пропорциональная числу частиц. При постоянной плотности частиц эта энергия пропорциональна объему вещества. В момент возбуждения колебаний освобождаемая мощность P^+ превышает мощность потерь P^- объемная плотность поля монотонно возрастает. По мере нарастания плотности поля увеличивается вероятность индуцированных переходов, при этом ускоряется процесс обеднения верхнего рабочего уровня. Если в единицу времени верхний рабочий уровень покидает большее число частиц, чем доставляется накачкой и возвращается с нижнего уровня, то инверсия населенности рабочих уровней начинает падать.

В предельном случае при $\rho \rightarrow \infty$ населенность верхнего рабочего уровня приблизится к населенности нижнего. Происходит насыщение перехода, что показано на графике а). Явление насыщения и определяет стационарную амплитуду колебаний в квантовом генераторе. Зависимость мощности, отдаваемой активной средой P^+ и отрицательного коэффициента плотности фотонного поля ρ ,

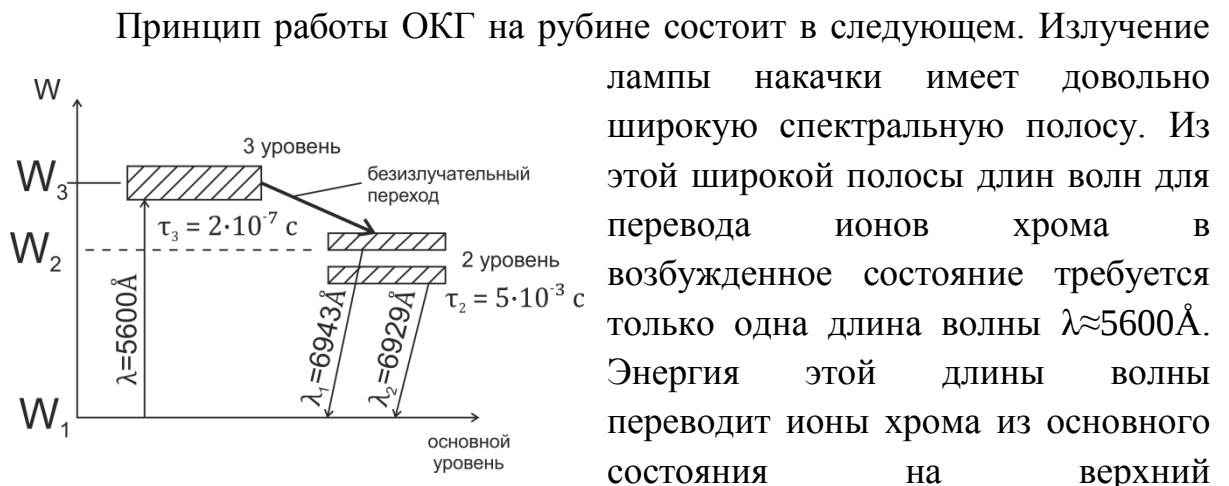
коэффициентом отражения $\Gamma_2^2 = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}} < 1$ (при этом $\Gamma_1 = 1$). Исходя из условия самовозбуждения.

$\Gamma_1^2 \Gamma_2^2 \exp(\alpha 2L) \geq 1$, график г) показывает функциональную зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ от связи Γ_2 резонатора с нагрузкой на рис. д).

Таким образом, выходная мощность $P_{\text{вых}}$ рубинового лазера зависит от:

- а) энергии накачки ρ_n ,
- в) оптимальной связи резонатора с нагрузкой Γ_2 ,
- д) отрицательного показателя поглощения α ,
- ж) длины кристалла L .

2.1.14 Схема энергетических уровней рубина приведена на рисунке.

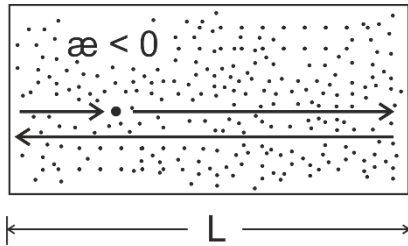


лампы накачки имеет довольно широкую спектральную полосу. Из этой широкой полосы длин волн для перевода ионов хрома в возбужденное состояние требуется только одна длина волны $\lambda \approx 5600 \text{ Å}$. Энергия этой длины волны переводит ионы хрома из основного состояния на верхний энергетический уровень W_3 . С верхнего уровня ионы хрома безизлучательно переходят на средний уровень. Энергия в этом случае отдается кристаллической решетке. С этого уровня ионы хрома переходят на нижний, исходный, уровень, отдавая избыточную энергию в виде фотонов света с длиной волны $\lambda \approx 0,7$ микрона. В этом особенность работы рубинового активного вещества. Существенным является тот факт, что время жизни ионов τ_3 на верхнем энергетическом уровне W_3 весьма мало и составляет $\tau_3 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, после чего ионы переходят на уровень W_2 . Время жизни иона на уровне W_2 значительно больше и составляет $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Учитывая, что время жизни ионов хрома на этих уровнях существенно различно ($\tau_2 \gg \tau_3$) следует ожидать, что все ионы через некоторый интервал времени соберутся на 2ом энергетическом уровне W_2 . Создается инверсия населенности так как все ионы, которые были на

уровне 1, теперь сосредоточенны на уровне 2, чтобы обеспечить стимулированное излучение фотонов света с длиной волны 0,7 мкм.

Следовательно, состояние с инверсной населенностью в рубиновом лазере обеспечивается неравенством времени жизни на 2ом и 3ьем энергетических уровнях $\tau_2 \gg \tau_3$.

2.1.15 Рассмотрим схему оптического квантового генератора, представленную на рисунке. Выберем внутри активной среды



некоторую точку А. Если из точки А выходит излучение в направлении оси, то оно вернется снова в эту точку, пройдя путь 2L внутри резонатора. При прохождении излучения по замкнутому контуру от точки А до этой же точки А сумма фазовых

сдвигов должна быть кратной 2π ($\angle \varphi = 2\pi n$). Обозначим фазовую постоянную распространения буквой k. Тогда сдвиг фаз на пути 2L составит $\angle \varphi = \frac{k}{2L}$. Сдвиг фаз при отражении от зеркала считаем

равным 0. Значения квантового числа из соотношения $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, где λ – длина волны в веществе. Теперь можно записать условие баланса фаз: $\angle \varphi = k \cdot 2L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L = 2\pi n$, а). Из условия баланса фаз получаем, что $L = n \frac{\lambda}{2}$, т.е. вдоль резонатора должно укладываться целое число полуволн, но это и есть условие существования стоячей волны в резонаторе. Если не будет стоячей волны, трудно будет обеспечить необходимую плотность поля.

Для усиления с коэффициентом усиления K и коэффициентом передачи цепи обратной связи β на возможной частоте генерации должно выполняться условие $K\beta > 1$, е). Усиление в нашем случае осуществляется средой, роль системы обратной связи выполняют зеркала. Величину усиления за два перехода можно определить, используя закон Бугера:

$$K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = -\exp(\alpha 2L), з),$$

Где $P_{\text{вых}}$ и $P_{\text{вх}}$ – мощности колебаний,

α – показатель отрицательного поглощения на частоте генерации.

Коэффициент передачи цепи обратной связи β должен быть найден с учетом потерь в зеркалах и нагрузке.

Γ_1 и Γ_2 – коэффициенты отражения первого и второго зеркала. Очевидно, что отношение отраженной и падающей мощности связано с квадратом коэффициента отражения (если Γ определен через амплитудные значения):

$$\Gamma^2 = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пад}}}.$$

В результате коэффициент передачи цепи обратной связи

$$\beta = \Gamma_1^2 \cdot \Gamma_2^2, \text{ и}).$$

Согласно $K\beta > 1$, условие баланса мощностей приобретает окончательный вид:

$$\Gamma_1^2 \cdot \Gamma_2^2 \exp(\alpha 2L) \geq 1$$

Итак, условие баланса фаз: $\angle \varphi = \varphi_K + \varphi_\beta = 2\pi n$ и

$$\text{условие баланса амплитуд: } \Gamma_1^2 \cdot \Gamma_2^2 \exp(\alpha 2L) \geq 1,$$

Являются необходимыми и достаточными условиями, при одновременном выполнении которых гарантируется возбуждение оптического квантового генератора.

2.1.16 Усиления не получится даже при $T \rightarrow \infty$, когда $N_1 \rightarrow N_2$. В крайнем случае $N_1 = N_2$. Количество переходов равно, нет ни усиления, ни поглощения. Среда прозрачна. Условие усиления $N_1 > N_2$ можно формально получить, если воспользоваться распределением Больцмана $\frac{N_1}{N_2} = \exp(\frac{W_2 - W_1}{kT})$, но значение температуры $T = -\frac{W_2 - W_1}{k \ln \frac{N_2}{N_1}}$

оказывается отрицательным, что физически невозможно.

2.1.17 Условием существования колебаний в ОКГ является баланс амплитуд (мощностей): $\Gamma_1^2 \cdot \Gamma_2^2 \exp(\alpha 2L) \geq 1$.

Вывод: существует минимальная длина рабочей среды, при которой возможно самовозбуждение ОКГ. Среда – усилитель, чем больше L , тем больше усиление при определенных потерях.

$$L_{\min} = \frac{\ln \frac{1}{\Gamma_1 \Gamma_2}}{2\alpha}$$

$L_{\min}$ кристалла зависит от степени эффективности усиления активной среды.

По этой причине газовые лазеры делают намного длиннее твердотельных.

2.1.18 Электронный способ возбуждения рабочих атомов в разряде более

эффективный по сравнению с другими способами создания активной среды, например, инжекционный лазер на p - n -переходе.

2.1.19 Применение оптической накачки в газовых квантовых генераторах нецелесообразно из-за узости спектральных линий поглощения газовой среды и значительных расстояний между ними.

В случае применения накачки от твердотельных ОКГ необходимо учитывать, что в твердотельных телах (рубин, стекло и др.), за счет влияния атомов друг на друга, ширина полосы излучения расширяется и получить состояние с инверсной населенностью затруднительно, так как очень узкая спектральная линия газовой среды может использовать незначительную долю мощности оптической накачки, потому что спектр излучения шире спектра поглощения.

Если же использовать для накачки газосветные лампы с узким спектром излучения, то мала вероятность совпадения линий излучения и линий поглощения. Такой способ оптической накачки также неэффективен.

2.1.20 Состояние с инверсной населенностью может быть получено в газовом разряде. Разряд получается при ионизации газа с помощью постоянного или высокочастотного поля. Рассмотрим, для примера, случай постоянного поля.

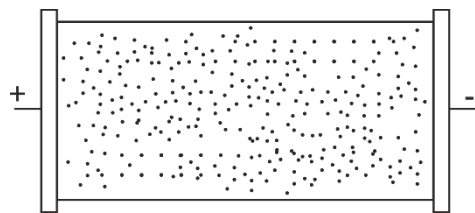
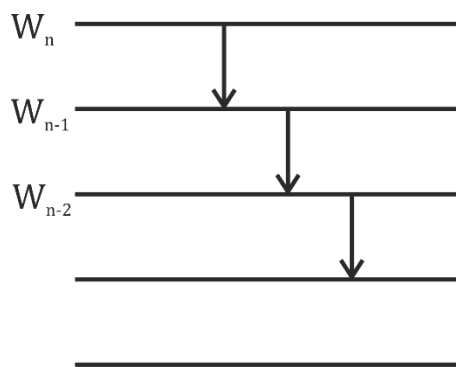


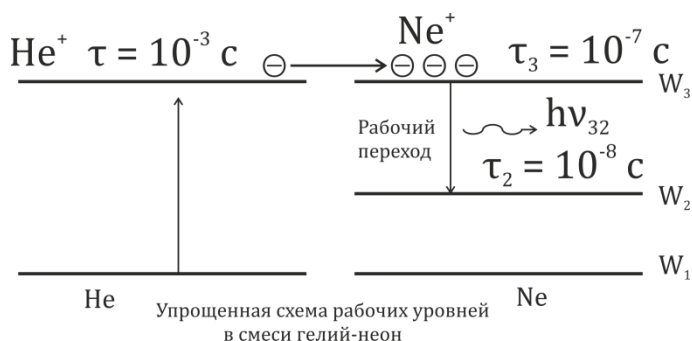
Схема возбуждения газового разряда с помощью постоянного электрического поля



Приложенная разность потенциалов $U=1...2$ тыс В приводит к ускорению отдельных электронов, имеющих в газовой смеси. Если их кинетическая энергия будет достаточной величины, произойдет ионизация газа. Возникает лавинообразный процесс, при котором значительно возрастает концентрация свободных электронов и ионов. В стационарном режиме их концентрация остается постоянной. Переход электронов с верхних состояний атома на нижние сопровождается спонтанным излучением. Это обычное свечение при газовом разряде. Происходит целая серия каскадных переходов, как показано на рисунке.

«Рабочим телом» в ОКГ на смеси гелия и неона является неон. Гелий служит своеобразным «накопителем» населенности.

Для получения высокой населенности необходимо, чтобы один из



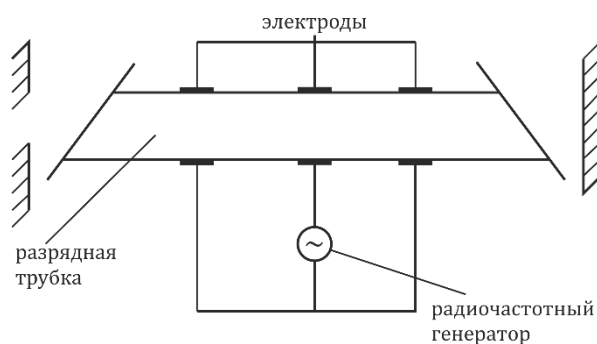
уровней был метастабильным, т.е. обладая очень высоким временем жизни ($\tau \sim 10^{-3}$ с). Такой уровень имеется в гелии, где переход в основное состояние запрещен. На

метастабильном уровне получается большая населенность. Между атомами гелия и неона происходят неупругие соударения, при которых передается энергия от атомов гелия к атомам неона.

Передача энергии происходит достаточно эффективно, так как расстояние между уровнями гелия и неона почти одинаково. Учитывая, что $\tau_2 \ll \tau_3$ уровень W_2 быстро очищается и создается инверсия населенности между уровнями W_3 и W_2 с рабочим переходом $h\nu_{32}$ ($\lambda \approx 0.64$ мкм).

2.1.21 В оптическом квантовом генераторе на смеси гелия и неона наличие электрода катода не обязательно, если применяется бесконтактное возбуждение газового разряда с помощью радиочастотного генератора (20 ... 40 МГц) мощностью 25 ... 100 Вт.

При этом выход генератора соединяется с разрядной трубкой надеваемыми на нее кольцевыми электродами. В зависимости от того, какая часть мощности генератора подается в трубку, интенсивность



разряда может меняться в широких пределах, а вместе с этим и выходная энергия лазера.

Так как радиочастотный генератор совместно с выпрямителем могут поддерживать разряд в газе длительное время, то столь же долго там будет существовать и «активная» среда; таким образом, газовый лазер является прибором непрерывного действия, в отличие от лазеров на кристаллах и стеклах, чаще всего работающих в импульсном режиме. Следует

заметить, что газовый лазер также может работать в импульсном режиме, если высокое напряжение на него будет подаваться от импульсного генератора напряжения. Так как плотность газа меньше плотности твердого тела, то импульсная мощность газового лазера будет значительно меньше, чем у кристаллических лазеров, но зато из-за лучших условий теплоотвода от разрядной трубки частота импульсов газового лазера будет во много раз выше.

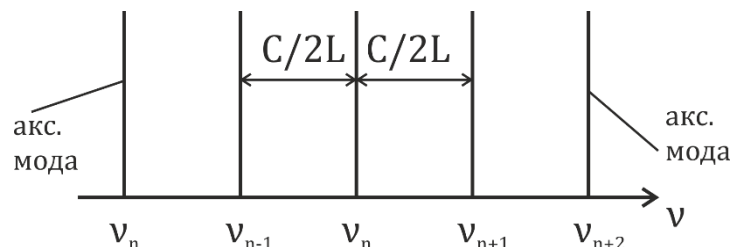
2.1.22 В газовом оптическом квантовом генераторе используется смесь газов, в которой неон является «рабочим» телом ОКГ, а гелий является своеобразным «накопителем» населенности. Компоненты такой смеси путем эффективного взаимодействия обеспечивают состояние инверсной населенности в газовой среде ОКГ.

2.1.23 В оптическом квантовом генераторе на смеси гелия и неона зеркало совершенно обязательно для создания обратной связи, необходимой для генерации света.

2.1.24 Оптический интерферометр имеет свою собственную систему частот (многомодовую частотную характеристику).

Интерферометр может работать на тех частотах, при которых укладывается целое число полувольт $n \frac{\lambda}{2} = L$, где n – целое число.

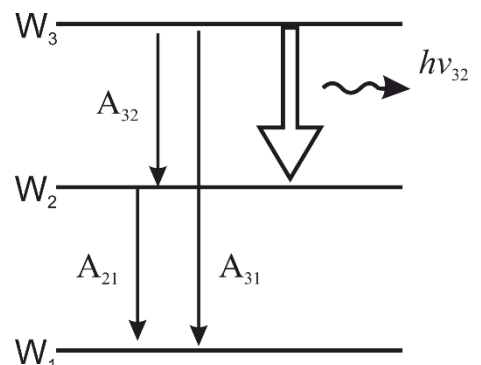
Собственные частоты интерферометра совпадают с частотами из баланса фаз. Расстояние между частотами $\Delta\nu$ зависит от длины интерферометра L и коэффициента преломления среды η ($\eta=1$)



2.1.25 Если рассмотреть процесс излучения микрочастицей (после получения энергии), то очевидно, что он носит затухающий характер. Через некоторое время частица вновь получит порцию энергии и вновь излучит ее на частоте $\Delta\nu_e = \frac{1}{\tau_0}$,

где $\Delta\nu_e$ – ширина линии излучения, τ_0 – среднее время жизни частицы, находящейся в возбужденном состоянии.

Ширина линии, связанная с потерей



энергии на излучение называется естественной шириной линии. Естественная ширина линии излучения определяется природой данного генератора и связана с процессом спонтанного излучения. Например, в 3-х уровневой энергетической системе естественная ширина линии излучения ОКГ $\Delta\nu_e$ соответствующая переходу 3-2 определяется

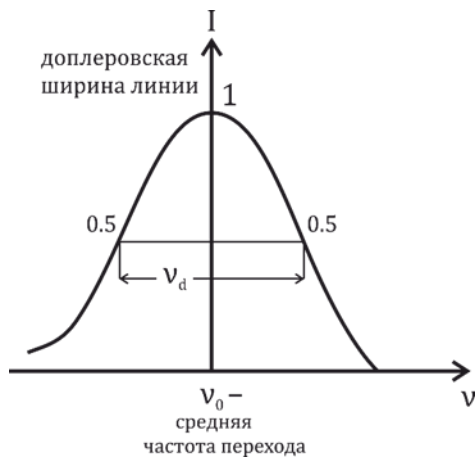
$$\Delta\nu_e = \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_2} = A_{32} + A_{31} + A_{21}$$

2.1.26 В оптическом диапазоне существенный вклад в ширину линии вносит доплеровское уширение ($\Delta\nu_d$). Атомы и молекулы активной среды участвуют в тепловом движении. Значение скоростей молекул, в случае газа, подчиняется статистике Максвелла. Различные скорости источника излучения соответствует разным частотам, оцениваемым неподвижным наблюдателем.

При возрастании температуры T доплеровская ширина спектра $\Delta\nu_d$ увеличится, так как средняя скорость молекулы газа определяется температурой.

$$\bar{v} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

2.1.27 Наблюдаемая доплеровская спектральная линия вещества представляет собой суперпозицию спектральных линий всех частиц вещества, т. е. линий с различными центральными частотами ν_0 . Для легких частиц при обычной температуре ширина доплеровской линии в оптическом диапазоне может превышать естественную ширину линии ($\nu_d > \nu_e$) на несколько порядков и достигать значения более 1 ГГц

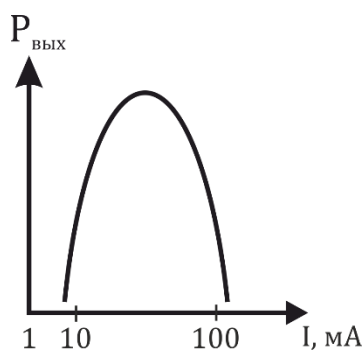


Форму доплеровской спектральной линии можно получить из распределения Максвелла-Больцмана. Эта зависимость является гауссовой функцией. Соответствующая значению $\frac{I_0}{2}$ ширина линии

$$\Delta\nu_d = \nu_0 \sqrt{(2\ln 2) \left(\frac{kT}{Mc^2} \right)}.$$

Таким образом, доплеровская ширина спектра определяется массой частиц M и температурой T .

2.1.28 В ОКГ на смеси гелия и неона зависимость выходной мощности от тока разряда имеет резко выраженный характер. При малом токе (но



больше пускового) мощность генерации возрастает с ростом тока, так как увеличивается количество электронов в плазме газового разряда. При этом убыстряются процессы заполнения верхних энергетических уровней гелия и неона, что приводит к увеличению разности населенностей рабочих уровней. Однако после

достижения определенной концентрации электронов в плазме существенную роль начинает играть процесс ступенчатого возбуждения нижних рабочих уровней неона при взаимодействии с метастабильными уровнями. Это приводит к снижению инверсии населенности рабочих уровней и, следовательно, к уменьшению мощности генерации.

С ростом общего давления в смеси увеличивается концентрация атомов гелия и неона и растут населенности возбужденных уровней и выходная мощность. Однако при высоком давлении, когда концентрация частиц в разряде становится большой, уменьшается длина свободного пробега электрона и, соответственно, уменьшается энергия, приобретаемая электроном на этом пути в электрическом поле. Последнее приводит к уменьшению энергии, передаваемой атомам гелия, и к снижению мощности излучения. Оптимальное давление составляет примерно 100 Па.

ОКГ на смеси гелия-неона обладают сравнительно невысокой мощностью, в пределах десятков милливатт, работают в непрерывном режиме с относительно «чистым» спектром.

Мощность излучения в ОКГ на углекислом газе может достигать единиц киловатт.

2.1.29 В оптических резонаторах возникают колебания различных типов.

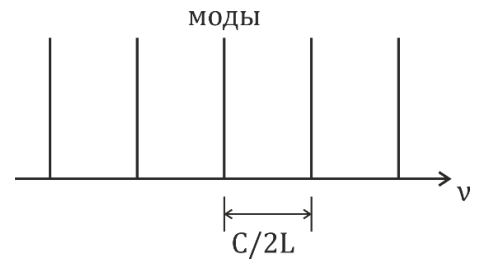
Нормальные типы колебаний (моды) резонаторов можно рассматривать как результат интерференции плоских волн, распространяющихся от одного прямоугольного плоского зеркала к

другому. В результате в резонаторе образуются стоячие волны.

Различают следующие типы колебаний в резонаторах:

- 1) ТЕМ,
- 2) Продольные моды,
- 3) Поперечные моды.

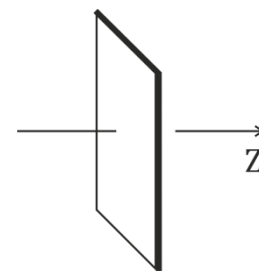
Продольные моды – типы колебаний, характеризующиеся распределением поля в продольном направлении (в направлении оси z). Частоты $\nu_n = \frac{c}{2L}n$ характеризуют продольные моды (аксиальные моды). Индекс n – индекс продольной моды.



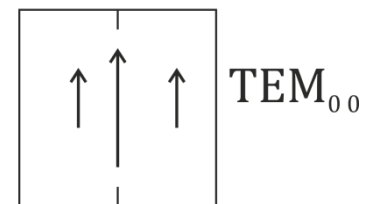
Частотная характеристика многомодового интерферометра.

Расстояние между частотами зависит от длины интерферометра L и коэффициента преломления среды: $\Delta\nu = \frac{c}{2L}\eta$; $\eta = 1$.

Поперечные моды – типы колебаний, характеризующиеся распределением поля в поперечной плоскости, перпендикулярной к оси z . В качестве такой плоскости можно рассмотреть плоскость прямоугольного зеркала.

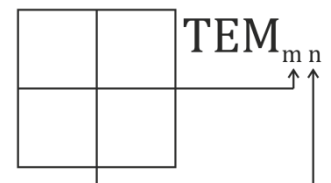


Простейший характер распределения тока на зеркалах, обозначается волной TEM_{00} . В общем случае характер распределения поля может быть сложным.



m – число перемен знака тока по горизонтали,

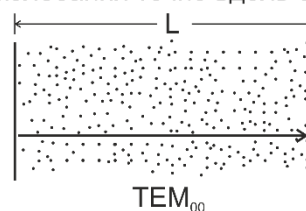
n – число перемен знака тока по вертикали.



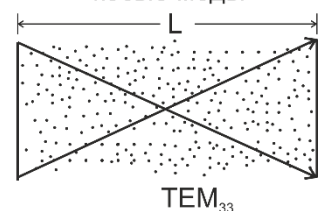
2.1.30 На функциональной схеме ОКГ показаны колебания

В интерферометре могут существовать любые колебания. В генераторе будут возбуждаться такие типы колебаний, которые обладают наименьшими потерями и соответствующие малым индексам, т. е. направленные почти вдоль оси. При генерации некоторых колебаний типа ТЕМ излучение лазера будет иметь конечную расходимость, так как на этом типе колебаний зеркало не представляет

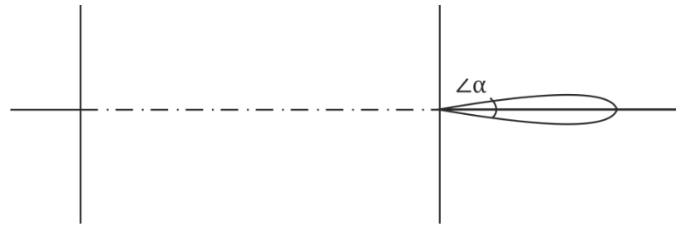
колебания точно вдоль оси



косые моды



идеально сфазированной решетки. Для уменьшения $\angle \varphi$ – угла расходимости, следует увеличить потери на косых модах, т. е. увеличить длину интерферометра L . Угол расходимости будет зависеть от мощности (плотности поля стоячей волны) внутри интерферометра.



Излучение лазера характеризуется узконаправленностью, монохроматичностью и когерентностью, что обусловлено физикой индуцированного (вынужденного) излучения.

2.1.31 Если осветить экран параллельным пучком света, состоящим из плоских волн от ОКГ, то в области геометрической тени интенсивность света не равна нулю и постепенно уменьшается вглубь, а в освещенной области возникают полосы максимумов и минимумов освещенности, параллельные краю экрана. Это и есть наблюдаемая дифракционная картина излучения ОКГ, обусловленная волновой природой света, в частности, пространственной и временной когерентностью, которыми обладает световая волна ОКГ.

2.1.32 В законе Бугера $P(z) = p_0 \exp(-\alpha \cdot z)$ в показателе экспоненты содержится величина $\alpha = \frac{h\nu(N_1 - N_2)B}{v_{\text{гр}}}$, которая учитывает поглощение мощности света, взаимодействующего с веществом. Знак показателя поглощения α зависит от соотношения населенности (N_1 и N_2) энергетических уровней.

Очевидно, что $\alpha < 0$ при инверсной населенности. Имеет место отрицательное поглощение или усиление света в «активной» среде вещества.

2.1.33 В газовых ОКГ оптические окна, ограничивающие газоразрядную трубку, наклонены к ней под вполне определенным углом (угол Брюстера), что обеспечивает наименьшие потери при многократном прохождении излучения через окна, уменьшает влияние отражений. Отраженный от окон свет полностью поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Это означает, что излучение, поляризованное в плоскости падения, проходит через окна без потерь. Таким образом, установка окон под углом Брюстера эквивалентна их «просветлению» для одного вида поляризации. Просветление окон

совершенно необходимо, поскольку в газовой среде получается сравнительно низкое усиление за один проход луча ($\sim 1 \dots 10\%$). При больших потерях света колебания могут не возникнуть совсем.

2.1.34 1 – $\Delta\nu_d$ – доплеровская ширина линии излучения;

2 – $\Delta\nu_{ег} = \frac{8\pi h\nu}{p} \Delta\nu_e$ – естественная ширина линии генератора. В работающем генераторе ширина линии сужается. В ОКГ ширина линии много уже, чем для отдельного излучателя;

3 – $\Delta\nu_r$ – ширина линии генерации, включая нестабильность технического резонатора, определяется плотностью поля и добротностью типа колебания;

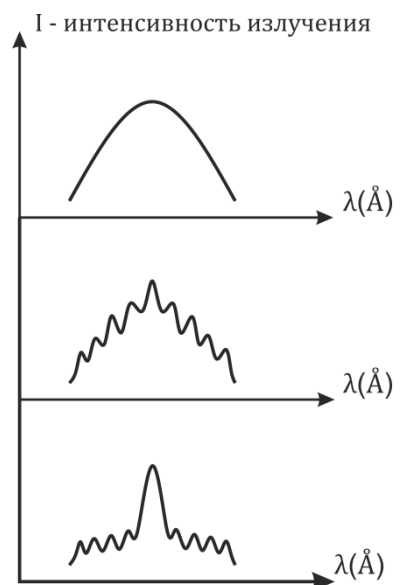
4 – $\Delta\nu_e$ – естественная ширина линии излучения вещества, определяется спонтанным излучением, зависит от числа уровней;

5 – $\Delta\nu_p$ – ширина (полоса) линии резонатора (без генерации) $\Delta\nu_p < \Delta\nu_e$.

2.1.35 Обычно ширина спектральной линии вещества настолько велика, что в нее входят несколько мод. При достаточном усилении рабочего тела, условия возбуждения выполняются для нескольких мод.

2.1.36 Частотный разнос между модами тем меньше, чем меньше отношение скорости света к длине резонатора $\frac{c}{2L}$. Эта особенность определяет большую плотность собственных частот и возможность одновременного возбуждения в резонаторе множества мод.

2.1.37 Инжекционный лазер на полупроводниковом диоде обладает высоким КПД и малыми размерами кристалла (порядка единиц и даже десятых долей миллиметра). Лазеры на гетеропереходах способны работать при комнатных температурах. Уровни мощности позволяют широко использовать их в волоконно-оптических линиях связи. Высокие значения КПД и возможность работать в широком диапазоне частот позволяет использовать их в качестве генераторов накачки квантовых



Вопрос 2.1.38
Спектры излучения р-п-перехода
при различных инжекциях

генераторов различных типов.

2.1.38

- 1 – люминесценция,
- 2 – сверхлюминесценция,
- 3 – участок когерентного излучения.

2.2 Условия возбуждения квантовых генераторов

2.2.1

- 1 – активное вещество ($\alpha < 0$)
- 2 – зеркала открытого резонатора
- 3 – источник возбуждения
- 4 – возбуждающее электромагнитное поле
- 5 – источник питания

2.2.2 На рисунке блок-схеме изображено устройство, в которой обратная связь обеспечивает возбуждение активной среды и индуцирует квантовые переходы на рабочей частоте. За счет этого соблюдается баланс фаз и баланс амплитуд, необходимые для поддержания устойчивого излучения.

2.2.3 Резонаторы Фабри-Перо применяются преимущественно на миллиметровых субмиллиметровых длинах волн, поскольку только в этом случае легко сделать размеры пластин много большими длины волны. В области дециметровых и сантиметровых длин волн квазиоптические резонаторы достигали бы несоизмеримо больших габаритов.

Наличие только двух параллельных стенок-пластин в открытом (без боковых стенок) оптическом резонаторе позволяет уменьшать число видов колебаний (число мод).

2.2.4 ОКГ обеспечивает многократное отражение электромагнитной волны (положительная обратная связь), концентрирует электромагнитную энергию, требуемой частоты и обеспечивает острый резонанс при генерации колебаний.

2.2.5 Первоначально возникшие электромагнитные колебания в открытом

резонаторе ОКУ претерпевают многократные отражения от зеркальных пластин, что приводит к образованию стоячих волн с большой объемной плотностью поля ρ .

2.2.6 Важная особенность открытого резонатора состоит в том, что длина интерферометра L существенно больше рабочей длины волны ($L \gg \lambda$). Зеркала удалены друг от друга, например, на несколько сантиметров, а длина волны излучения $\sim 0,5 \dots 5$ мк. Точность обработки поверхности зеркал составляет доли длины волны. Поскольку размеры открытого зеркального резонатора значительно больше длины волны ($L \gg \lambda$), на которой работает ОКУ (в отличие от резонаторов СВЧ), то он имеет большое число видов колебаний.

2.3 Светодиоды

2.3.1 Светодиоды широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре в устройствах индикации: включения, готовности и работе, наличия напряжения, аварийной ситуации, достижения температурного порога, выполнения функционального задания. Видимая область спектра находится в диапазоне 380...760 нм.

2.3.2 Излучение светодиода основано на спонтанных переходах,

2.3.3 Светодиод обеспечивает некогерентное излучение, обусловленное спонтанными неуправляемыми переходами (в отличие от инжекционных диодов, в которых, при большом прямом токе обеспечивается когерентное излучение).

2.3.4 Цвет свечения характеризуется спектральными характеристиками излучения диодов. Диоды на основе фосфида галлия имеют спектральные характеристики с двумя выраженными максимумами в красном и зеленом участках спектра. В зависимости от количества активирующих примесей, внедренных в структуру излучающего кристалла при изготовлении, соотношение между значениями максимумов изменяется в сторону красного или зеленого цвета. При достижении этого соотношения 10:1 и выше получают красный или зеленый цвет излучения. При соотношениях максимумов 10:4 получают светодиоды желто-оранжевого цвета свечения.

Излучение диода характеризуется диаграммой направленности, которая определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала. Излучение светоизлучающего диода может быть узконаправленным или рассеянным.

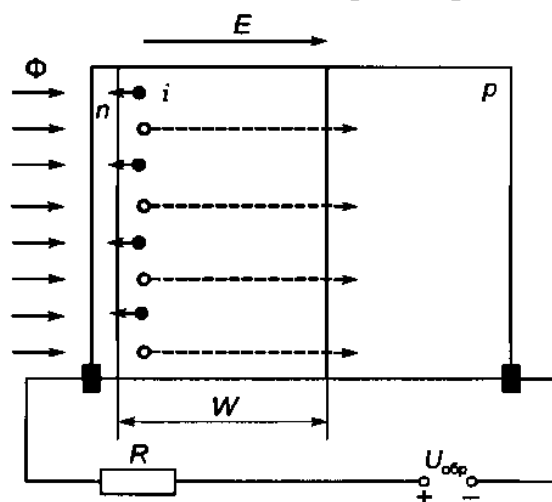
Эффективность работы СИД характеризуется зависимостями параметров оптического излучения от прямого тока через элемент от длины волны излучения. Зависимость потока излучения Φ , Вт, от прямого тока $I_{пр}$ называется излучательной (яркостной) характеристикой.

В справочной литературе излучательной характеристикой называют также зависимость яркости L , кд/м², от прямого тока, а зависимость силы света от прямого тока — световой характеристикой.

2.4 Фотоприемные устройства

2.4.1 Свет, попадая в твердое тело, вступает с ним во взаимодействие, связанное с обменом энергии. Часть энергии поглощается и идет на увеличение энергии электронов или фотонов – теплового движения атомов. Поглощение света в твердом теле происходит в соответствии с законом Бугера – Ламберта: $\Phi(x) = \Phi_0(1-R)\exp(-\alpha x)$, где R – коэффициент отражения, $\Phi(x)$ – поток световой энергии на расстоянии x от поверхности (вдоль луча), Φ_0 – падающий на поверхность поток световой энергии, α – коэффициент поглощения.

2.4.2 Упрощенная структура фотодиода на основе p - n -перехода приведена на рисунке. Такой прибор по существу представляет собой обратнo-смещенный p - n -переход. Важными свойствами такого перехода является наличие обедненной носителями области перехода, концентрирующей относительно сильное поле, и области поглощения, где поглощается падающий свет (захватываются фотоны).



Фотодиод с p - i - n структурой

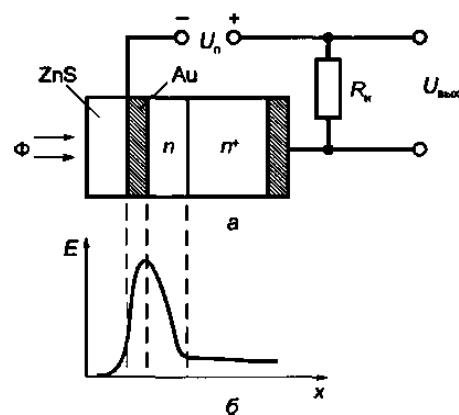
Обедненная область образуется неподвижными положительно заряженными атомами доноров в n -области и неподвижными отрицательно заряженными атомами акцепторов в p -области. Ширина обедненной области зависит от концентрации легирующих примесей. Чем меньше примесей, тем шире обедненный слой. Положение и ширина поглощающей области зависят от длины волны падающего света и от материала, из которого сделан диод.

2.4.3 Упрощенная структура фотодиода с барьером Шоттки показана на рисунке.

На подложке сильно легированного кремния n^+ выращивается тонкая эпитаксиальная пленка высокоомного полупроводника n -типа. Затем на тщательно очищенную поверхность материала n -типа напыляют тонкую ($\approx 0,1$ мкм) полупрозрачную пленку, а поверх нее — антиотражающее покрытие.

Структура и свойства контакта «металл-полупроводник» зависят от взаимного расположения уровней Ферми в металле и полупроводнике

Отличительной особенностью диодов Шоттки по сравнению с диодами на p - n -переходе является отсутствие инжекции неосновных носителей. Диода Шоттки используют движение основных носителей. В них отсутствуют медленные процессы, связанные с накоплением и рассасыванием неосновных носителей в базе диода.



Фотодиод с барьером Шоттки: а — структура; б — распределение поля в структуре

2.4.4 Гетерофотодиодом называют прибор, имеющий переходной слой, образованный полупроводниковыми материалами с разной шириной запрещенной зоны.

Устройство и принцип действия этих приборов рассмотрим на примере гетероструктуры GaAs-GaAlAs.

На подложке арсенида галлия n^+ типа ($N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) методом жидкофазной эпитаксии последовательно наращивают сначала слой чистого нелегированного арсенида галлия n -типа ($N_d \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а затем слой p^+ типа твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Обеспечение в растворе значения $X = 0,4$ приводит к различию ширин запрещенной

зоны по разные стороны гетероперехода $\approx 0,4$ эВ.

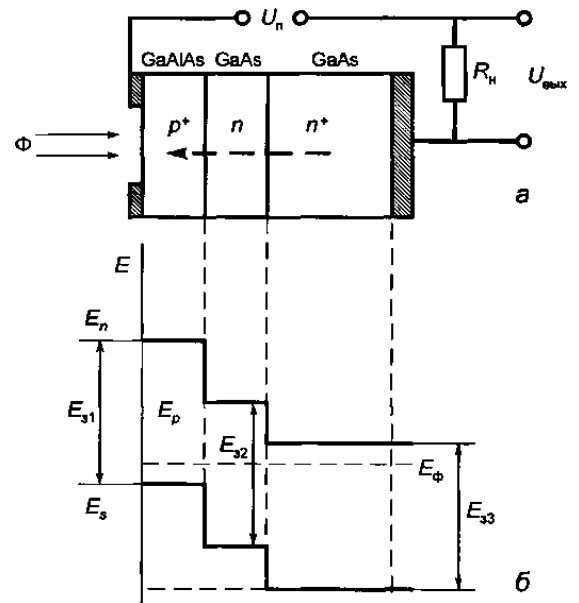
Слой GaAlAs играет роль широкозонного окна, пропускающего излучение, поглощаемое в средней n -области. Структура зонной диаграммы обеспечивает беспрепятственный перенос генерируемых в n -области дырок в p -область.

Толщина средней области h выбирается так, чтобы обеспечить поглощение всей падающей мощности. При $\lambda \approx 0,85$ мкм достаточно иметь $h \approx 20$ мкм. Высокая степень чистоты этой области обеспечивает малые рекомбинационные потери генерируемых светом носителей.

Фоточувствительность

гетерофотодиодов определяется эффективным временем жизни носителей в среднем слое, а время

переключения – толщиной этого слоя и напряженностью электрического поля. Применение совершенных гетероструктур (с низкой плотностью поверхностных состояний) открывает возможности создания фотодиодов с кпд, близким к 100%. Сочетание малого времени рассасывания неравновесных носителей заряда и малого значения барьерной емкости обеспечивает высокое быстродействие гетерофотодиодов. Такие приборы могут эффективно работать при малых обратных напряжениях. Подбирая пары полупроводниковых материалов можно получать фотодиоды, работающие в любой части оптического диапазона длин волн. Это преимущество обусловлено тем, что в гетерофотодиоде рабочая длина волны определяется разницей ширин запрещенных зон и не связана со спектральной характеристикой глубины поглощения. Вследствие хороших возможностей выбора материала базы достигаемое значение фотоЭДС у гетерофотодиодов составляет $(0,8...1,1)$ В, что в два – три раза выше, чем у кремниевых фотодиодов. Основной недостаток гетерофотодиодов присущая гетероструктурам – сложность изготовления.



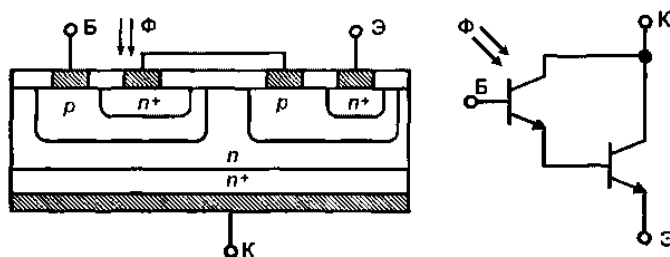
Фотодиод с гетероструктурой: а — структура; б — энергетическая диаграмма

2.4.5 Одним из путей создания быстродействующих фотоприемников с высокой чувствительностью является использование лавинного пробоя, в частности, создание лавинных фотодиодов. Если поле в активной зоне фотодиода велико и энергия, приобретаемая фотонесителями тока (электронами и дырками) в этом поле, превышает энергию образования электронно-дырочных пар, то происходит лавинообразный процесс размножения носителей. Процесс размножения начинается с генерации носителей под действием излучения, т.е. имеем фотодиод с лавинным размножением носителей.

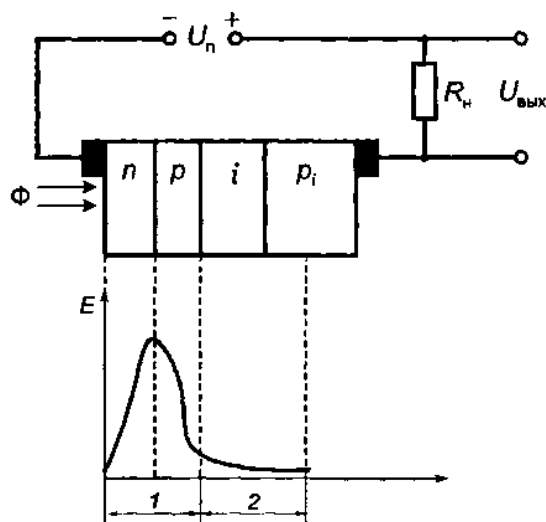
В режиме лавинного фотоумножения успешно опробованы практически все диодные структуры: p^+-n , $p-i-n$, $n-p-i-p^+$ барьер Шоттки.

Предельно реализуемое значение коэффициента усиления фототока K_i может быть тем больше, чем меньше тепловой обратный ток фотодиода.

2.4.6 Фотоприемные приборы, использующие транзисторные структуры с возможностью усиления фототока, называются *фототранзисторами*. Эти приборы содержат один или несколько транзисторов, включенных обычно по схеме с общим эмиттером.



Составной фототранзистор



Лавинный фотодиод: а — структура; б — распределение поля в структуре; 1 — область сильного поля; 2 — обедненная область

2.4.7 В простейшем фототранзисторе оптическое излучение попадает в

рабочую область структуры — базу. Здесь обеспечивается генерация фотоносителей, которые затем разделяются p - n -переходом. Разделение фотоносителей сопровождается дополнительным увеличением концентрации за счет механизма электрического усиления.

2.4.8 Широкое применение фототранзисторов и улучшение параметров этих приборов затрудняет, в частности, следующее обстоятельство: высокий коэффициент передачи и малое время переключения требуют уменьшения толщины базовой области h_b а это приводит к снижению фоточувствительности. Необходимость компромисса между указанными параметрами определяет относительно низкое быстродействие фототранзисторов ($10^{-6} \dots 10^{-5}$) с.

2.5 Фоторезисторы

2.5.1 В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Основным элемент фоторезистора — полупроводниковая пластина, сопротивление которой при освещении изменяется.

Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электропроводные электроды. Принципиально возможны две конструкции фоторезисторов: поперечная и продольная.

2.6 Оптроны

2.6.1 **Оптронами** называются такие оптоэлектронные приборы, в которых имеются излучатели и фотоприемники, используются оптические и электрические связи, а также конструктивно созданные друг с другом элементы. Некоторые разновидности оптронов называются *оптопарами*, или *оптоизоляторами*.

Принцип действия любого оптрона основан на двойном преобразовании энергии. В излучателях энергия электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках, наоборот, оптический сигнал вызывает электрический ток или напряжение или приводит к изменению его сопротивления.



Структурная схема оптрона с внутренней оптической связью

Наибольшее распространение получили оптроны с внешними электрическими выходами и выходными сигналами, и внутренними оптическими сигналами.

В электрической схеме такой прибор выполняет функцию выходного элемента — фотоприемника с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входа и выхода.

2.6.2 К основным параметрам оптрона относятся: коэффициент передачи тока, сопротивление развязки и быстродействие.

Основные характеристики оптронов представлены в таблице, где быстродействие оптронов характеризуется суммарным временем включения и выключения. Резисторные оптроны принято характеризовать не коэффициентом передачи, а отношением темнового сопротивления резистора R_T к сопротивлению при освещении R_{oc} .

Принципиальные физические достоинства оптронов, как уже отмечалось выше, обусловленные использованием фотонов в качестве носителей информации, заключаются в обеспечении очень высокой электрической изоляции входа и выхода, однонаправленности потока информации, отсутствии обратной связи с выхода на вход и широкой полосе пропускания.

Таблица 7. 1. Основные характеристики оптронов	Тип оптрона	Коэффициент передачи, %	Сопротивление связи, Ом	Быстродействие, с	R_T/R_{oc}
Диодные		0, 5... 1	$10^{11} \dots 10^{13}$	10^{-8*}	-
Транзисторные		10... 100 1000... 10000 (схема Дарлингтона)	$10^{11} \dots 10^{13}$	$(2 \dots 5) 10^{-6}$	-
Тиристорные		100	$10^{11} \dots 10^{13}$	$(20 \dots 100) 10^{-6}$	-
Резисторные		-	-	$10^{-1} \dots 10^{-2}$	$10^4 \dots 10^7$
* Для p-i-n-диода в качестве фотоприемника.					

План УМД на 2013/2014 уч.г.
С. 6, п. 30.

Григорий Маркович Аристархов
Андрей Альбертович Елизаров
Виталий Иванович Николотов

ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

в вопросах и ответах

Часть 3

КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Учебное пособие

Подписано в печать 06.09.13. Формат 60х90 1/16.
Объем 4,1 усл.п.л. Тираж 250 экз. Изд. № 52. Заказ 125.

ООО «ТиРу». Москва, ул. Правды, д. 24, стр. 5.