

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

**«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»**

Кафедра физики

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА**

Методические указания к лабораторной работе № 11
по разделу «Квантовая физика» курса общей физики для студентов
технологических и механических специальностей дневной и
заочной формы обучения

Могилев 2012

УДК 532.516

Рассмотрены и рекомендованы к изданию
на заседании кафедры физики
Протокол № 7 от 6.02.2012

Составители

доктор физико-математических наук, профессор УО «МГУП»

В.А.Юревич,

кандидат физико-математических наук, доцент

УО «МГУ им. А.А. Кулешова»

Е.В.Тимощенко,

ассистент УО «МГУП» **Ю.В.Юревич**

Рецензент

кандидат физико-математических наук, доцент УО «МГУП»

А.С. Скапцов

УДК 532.516

©УО «Могилевский государственный
университет продовольствия», 2012

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение физических принципов устройства и управления излучением источников когерентного излучения.

ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ:

- 1 С применением программы моделирования построить временную зависимость излучения лазера в режиме излучения моноимпульсов.
- 2 Изучить условия реализации автоколебательного режима излучения лазеров.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: персональный компьютер, прикладная программа моделирования лазерной генерации PrSelf_2.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Лазеры — это источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. Благодаря этим свойствам лазеры нашли широкое применение в оборонной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, в оптических системах навигации и раннего обнаружения, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т. д. Хотя первый лазер был создан немногим более полувека тому назад, но многие современные технические устройства уже невозможно представить без лазеров.

Одним из важнейших свойств лазерного излучения является высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении не лазерных источников. Это свойство, как и возможность высокой концентрации мощности светового электромагнитного поля в узком пространственном канале (тонком световом пучке), равно как и ряд других уникальных свойств лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества. Такой характер испускания приводит к тому, что колебания электрического и магнитного силовых векторов в цугах электромагнитных волн, образующих световые лучи, происходят в высшей мере синхронно вдоль светового пучка и в его сечении, именно поэтому и говорят о *когерентности излучения лазера*.

Лазер представляет собой устройство квантовой оптики. В его основе лежит явление вынужденного излучения, возможность которого была предсказана в 1916 году А. Эйнштейном. Для объяснения наблюдавшегося в эксперименте термодинамического равновесия между веществом и испускаемым и поглощаемым им световым излучением было предположено, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать третий, качественно иной тип взаимодействия. Переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на

нижний должен происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение получило название *вынужденного* или индуцированного. Вынужденное излучение отличается от спонтанного тем, что в результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На рисунке 1 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта.

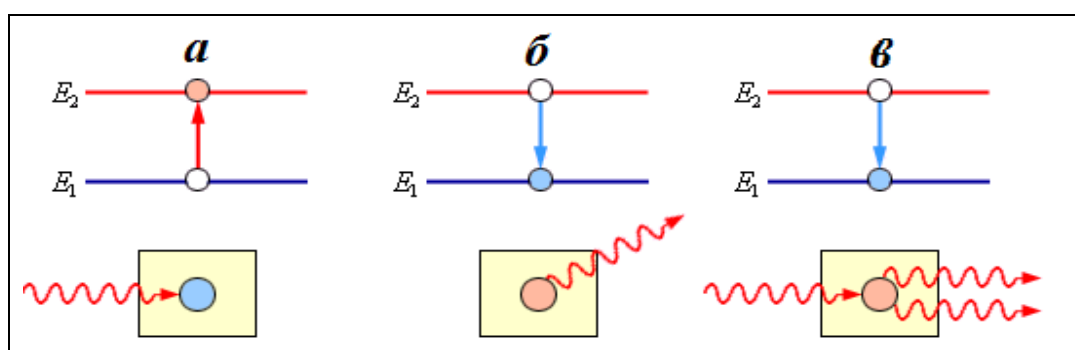


Рисунок 1 - Условное изображение процессов поглощения (а), спонтанного испускания (б), и индуцированного испускания кванта (в)

На языке волновой теории это означает, что атомом излучается электромагнитная волна с частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения, точно такими же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбуждённого атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона – близнеца. Именно вынужденное излучение является физической основой работы лазеров. Название самих приборов составлено из первых букв английского выражения: «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» (*laser*), что в переводе означает «усиление света при вынужденном испускании излучения».

Рассмотрим слой оптической среды, атомы которой могут находиться в состояниях 1 и 2 с дефектом энергии $\Delta E = E_2 - E_1 > 0$. Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода $\omega = \Delta E / \hbar$. Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии 1. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии 2, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через n_1 и $n_2 < n_1$. При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображённые на рисунке 1. Эйнштейном было показано, что процесс (а) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (в) индуцированного испускания кванта возбуждённым атомом имеют одинаковые вероятности. Так как $n_2 < n_1$, поглощение фотонов будет происходить чаще,

чем индуцированное испускание. В результате ослабляется интенсивность прошедшего через слой вещества излучения. Этим явлением можно объяснить наличие в спектре солнечного света относительно тёмных линий, называемых фраунгоферовыми. Излучение, возникшее в результате спонтанных переходов (β), не когерентно и распространяется во всевозможных направлениях, не создавая вклада в проходящую волну.

1 УСИЛЕНИЕ СВЕТА В ИНВЕРСНЫХ СРЕДАХ

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $n_2 > n_1$, т. е. создать *инверсную заселённость* уровней. Такая среда является термодинамически неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана советским физиком В.А. Фабрикантом в 1940 г. В 1954 г. явление индуцированного испускания было реализовано учёными из Физического Института АН СССР Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым и независимо от них – исследователем из США Ч. Таунсом в опытах по созданию микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1,27$ см. В 1964 году за разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн все трое исследователей были удостоены Нобелевской премии.

Среда, в которой создана инверсная заселённость уровней, называется *активной (усиливающим элементом)*. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того, чтобы возникла генерация света и его свойства были непрерывными, необходимо использовать *обратную связь* – частично вернуть сигнал назад в устройство для его дальнейшего усиления. Поэтому активную среду располагают между двумя высококачественными зеркалами (рисунок 2), отражающими свет строго назад, чтобы он многократно прошёл через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. Система, образованная двумя такими отражателями, представляет собой *оптический резонатор*. Суть его использования именно в искусственном удлинении пути, проходимого светом внутри усиливающего элемента. Многократное повторение процесса усиления, возникающее при наличии зеркал, по своему эффекту эквивалентно существенному увеличению длины активного стержня. Одно из зеркал (r_0) обычно полностью отражает излучение, другое (r) – частично пропускает свет. В каждом цикле при подходе к правому зеркалу $(1 - r) \cdot 100\%$ световых квантов выходит наружу. Так как между зеркалами создаются очень большие плотности лучистой энергии, то поток, выходящий за пределы резонатора, будет значителен. Этот поток и образует лазерный пучок света (IV). В то же время излучение, которое идёт под наклонными углами к оси резонатора (V), выходит из активной среды без заметного усиления. Усилиться способны только те лучи, направление которых совпадает с горизонтальной линией – осью резонатора Ox . В итоге формируется световой пучок с крайне малой расходимостью и плоским волновым фронтом.

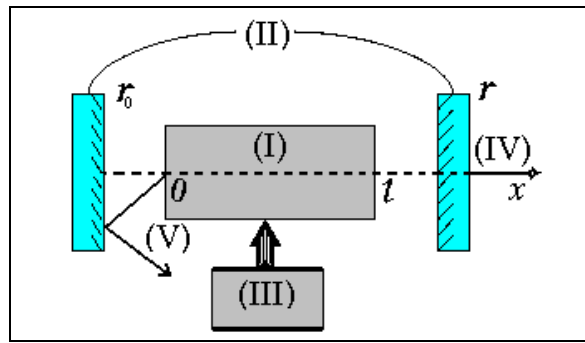


Рисунок 2 - Схема лазера: (I) - активная среда длины l , (II) - резонатор, образованный двумя плоскими параллельными зеркалами, (III) - система накачки. На схеме указан пучок выходного излучения лазера (IV) и луч (V), идущий под значительным углом к оси резонатора и «сбегающий» с зеркал

Для генерации инверсную заселённость уровней следует непрерывно поддерживать в усиливающем элементе, размещённом в лазерном резонаторе. Расстояние между энергетическими уровнями активной среды E_1, E_2 должно соответствовать ультрафиолетовой, видимой или ближней инфракрасной областям спектра (по правилу частот Бора – $\omega_{12} = \hbar(E_2 - E_1)$). На верхних уровнях рабочего перехода обычно слишком мало частиц, для создания инверсной населённости энергия должна подаваться на систему извне. Обеспечивающий непрерывность инверсии населённостей процесс именуют *накачкой*, система (устройство), которой устанавливается накачка, является важнейшим компонентом схемы лазера как оптического прибора.

Начало лавинообразному процессу в резонаторе при определенных условиях может положить случайное испускание резонансного фотона (например, в результате спонтанного акта люминесценции), с которого «стартует» генерация излучения, направленного вдоль оси системы резонатора. Излучение генерации выводится наружу через зеркала резонатора. Именно генерация электромагнитного поля светового излучения и есть явление, характеризующее лазер как прибор – особый источник света.

Инверсия образуется в активном элементе в результате поглощения световых квантов или энергии потока электронов, переводящих систему в возбужденное состояние. В первом случае говорят об *оптической*, во втором — об *электрической накачке*. Для оптического возбуждения обычно применяют импульсные газоразрядные лампы большой мощности (примерно $2 - 20$ кДж за $0,0001 \dots 0,001$ с). В последнее время для оптической накачки используют радиацию другого лазера. Применяется также химическая накачка. Она возможна, если в процессе химической реакции возникают молекулы, находящиеся в возбуждённом состоянии.

При оптической накачке возбуждение системы резонансным излучением частоты ω_{12} приводит к тому, что даже при очень больших интенсивностях падающей радиации на верхний уровень попадает не более половины всех частиц – инверсная заселенность уровней не образуется. Поэтому при оптической накачке

надо пользоваться многоуровневыми системами. Простейшая из них — трехуровневая — предложена впервые Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым (1955 г.). В этом случае для образования инверсии не требуется чрезмерно больших яркостей внешнего источника.

На рисунке 3,а изображена типичная схема трех уровней, позволяющая наглядно разъяснить сущность происходящих процессов. Весьма важно, чтобы уровень 2 был метастабилен. Это означает, что вероятность перехода между уровнями 2 и 1 (в канале $2 \Rightarrow 1$) должна быть значительно меньше вероятности перехода $3 \Rightarrow 2$. Такая ситуация реализуется, например, в рубине — первом из материалов, использованных для создания лазеров в видимой области спектра. Рубин представляет собой прозрачный диэлектрический кристалл Al_2O_3 с примесью ионов хрома Cr^{3+} . Переход $3 \Rightarrow 2$ в ионах хрома осуществляется неоптически с передачей энергии в кристаллическую решетку. Если возбуждать уровень 3 светом с частотой ω_{13} , то значительная часть ионов перейдет в состояние 2. Так как вероятность перехода $2 \Rightarrow 1$ мала, то ионы хрома будут накапливаться на уровне 2. При достаточно большой интенсивности поля излучения накачки число частиц на уровне 2 может превысить число частиц на исходном уровне 1. В результате образуется инверсия населенностей в канале $2 \Rightarrow 1$ и может быть выполнено условие, необходимое для возникновения усиления на частоте ω_{12} .

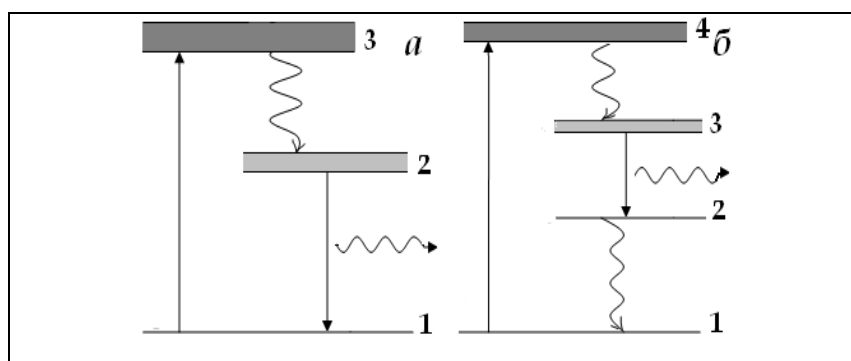


Рисунок 3 - Инверсия в схеме с тремя (а) и четырьмя уровнями (б). Волнистыми горизонтальными линиями в схемах обозначены каналы генерации

Для создания инверсии в рубине, на уровень 2 нужно перевести более половины частиц. Если использовать системы с четырьмя рабочими уровнями, то ситуация упрощается. К их числу относятся, в частности, неодимовое стекло и кристалл алюмоиттриевого граната с примесью ионов неодима ($Nd:YAG$). Схема основных уровней ионов Nd^{3+} изображена на рисунке 3,б. До возбуждения подавляющее число частиц находится на исходном уровне. Накачка осуществляется радиацией частоты ω_{14} . После этого возникает неоптический переход частиц с уровня 4 на метастабильный уровень 3, где и происходит накопление частиц. Поскольку число частиц на уровне 2 ничтожно малое, то инверсная заселенность уровней канала $3 \Rightarrow 2$ создается при переводе на уровень 3 даже небольшого количества частиц, поэтому в схеме с четырьмя уровнями создание инверсии происходит гораздо динамичнее и достижимо большее усиление при относительно более низком

уровне возбуждения. В целом же, коэффициент преобразования мощности накачки в мощность когерентного излучения в лазерах на люминесцентных кристаллах невысок - 5–7%.

Инверсная заселённость легко образуется также за счет энергии электронов. Это происходит, например, в лазере на смеси гелия и неона. При столкновении быстро движущихся электронов с атомами гелия происходит переход атомов гелия в возбужденное состояние. Возбужденные атомы гелия сталкиваются с атомами неона и передают им свою энергию возбуждения. Так как число уровней у атома неона велико, то легко находятся незаселённые уровни, энергия которых ниже энергии возбужденного состояния. Именно так и образуется способность неона к усилению возникающего при люминесценции излучения.

К настоящему времени предложено множество новых способов образования инверсной заселённости. К ней приводит, как правило, резкое нарушение термодинамического равновесия в системе, например при внезапном изменении давления газа. Число систем, в которых удалось образовать инверсную заселенность уровней, сравнительно невелико, хотя и составляет сейчас уже несколько тысяч. К ним относятся рубин, неодимовое стекло, гранат, фторид лития—натрия с примесью эрбия, алесандрит, смесь гелия и неона, ксенон, криптон, аргон, водород, окись углерода, углекислый газ, вода, аммиак, сероводород, довольно широкий ряд полупроводников, растворы и пары красителей...

Усиливающие элементы в разных лазерах различны. У одних элемент представляет собой кристаллический или стеклянный стержень цилиндрической формы. У других – это отпаянная стеклянная трубка, внутри которой находится специально подобранная газовая смесь. У третьих – кювета со специальной жидкостью. Соответственно различают лазеры твердотельные, газовые и жидкостные. Основу структуры активного элемента твердотельного лазера в физике именуют *матрицей* – это кристалл диэлектрика или стекло. В составе матрицы главную роль играют атомы (или, точнее, ионы), специально вводимые в виде небольшой примеси в кристалл в процессе его изготовления. Их называют *активными центрами*. Любой из лазеров имеет активный элемент, в структуре активного элемента есть активные центры. Именно в них зарождается лазерное излучение. Можно сказать, что когерентный лазерный пучок возникает как суммарный эффект синхронного высвечивания огромного множества активных центров.

Следует отметить, что у полупроводниковых лазеров (где активный элемент - кристаллик полупроводника или контакт из двух полупроводников разного типа) активных центров нет; излучение рождается здесь в результате соответствующих изменений состояния электронного коллектива. Впервые генерация в полупроводниковых средах была осуществлена группой исследователей из Физического Института АН СССР во главе с А.М. Прохоровым.

2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Лазеры с полупроводниковыми активными элементами довольно специфичны – физика процессов, методы накачки и конструкция сильно отличаются от

лазеров на других средах. Поэтому прежде кратко напомним об некоторых особенностях этих кристаллов. В атоме энергия электрона принимает строго определенные дискретные значения; энергетические состояния электрона в атоме описываются на языке уровней. В кристалле же вместо системы уровней рассматриваются *энергетические зоны*. Энергия электрона может принимать любое значение в пределах зоны. Одновременно в зоне может находиться, хотя и очень большое, но все же конечное число электронов, поэтому зона может быть полностью или не полностью заполненной электронами. Зона начинает заполняться электронами снизу, т.е. в направлении от более низких к более высоким значениям энергии. Степень заполнения зон электронами, величина межзонных промежутков, возможное взаимное перекрытие зон – все это позволяет объяснить общеизвестное деление твердых тел на металлы, диэлектрики и полупроводники. В дальнейшем изложении важны именно полупроводники, поэтому ограничимся энергетическими состояниями электронов в полупроводниковых кристаллах.

Особо выделяются две энергетические зоны – так называемую *валентную* и расположенную над ней (по шкале энергий) зону *проводимости*. Между зонами есть промежуток запрещенных значений энергии шириной не более 1 – 3 эВ; его называют *запрещенной зоной* (это – зона значений энергии, которых электроны в данном веществе принимать *не могут*). Допустим, что температура полупроводника равна абсолютному нулю. В этом случае валентная зона должна быть полностью заполнена электронами, а зона проводимости должна быть пустой. В действительности же температура всегда выше абсолютного нуля, поэтому можно говорить о тепловом возбуждении электронов. Оно приводит к тому, что часть электронов перескакивает из валентной зоны в зону проводимости; таких электронов будет тем больше, чем выше температура полупроводника. В результате в зоне проводимости появляется некоторое (относительно небольшое) количество электронов; в то же время валентной зоне до ее полного заполнения теперь не хватает соответствующего числа электронов.

Отсутствие электрона в валентной зоне удобно представлять как наличие в ней положительно заряженной частицы; ее называют *дыркой*. В беспримесном полупроводнике число электронов в зоне проводимости (в единице объема кристалла) точно равно числу дырок в валентной зоне. Квантовый переход электрона через запрещенную зону снизу вверх можно рассматривать как генерацию электронно - дырочной пары — появление электрона в зоне проводимости и одновременное появление дырки в валентной зоне. Электроны сосредотачиваются у нижнего края зоны проводимости, а дырки у верхнего края валентной зоны. Наряду с переходами через запрещенную зону снизу вверх возможны также обратные переходы – сверху вниз. Электрон может совершить скачок из зоны проводимости обратно в валентную зону; такой процесс называют *рекомбинацией электрона и дырки*.

Будем облучать полупроводник светом такой частоты, чтобы энергия фотонов слегка превышала ширину запрещенной зоны. Такой фотон может быть поглощен электроном вблизи верхнего края валентной зоны. В результате электрон совершит квантовый переход в зону проводимости. Практически с такой же веро-

ятностью фотон может вызвать встречный процесс – переход в валентную зону электрона из зоны проводимости (вблизи её нижнего края). При этом будет испущен еще один фотон (вторичный), причем в том же направлении, в каком летел первичный фотон. В первом случае имеем поглощение света в полупроводнике, а во втором – вынужденное испускание света. Возможно также самопроизвольное возвращение электрона из зоны проводимости в валентную зону – спонтанное испускание света.

Для создания полупроводникового лазера необходимо обеспечить преобладание процессов вынужденного испускания света над процессами его поглощения. Иначе говоря, надо сделать так, чтобы полупроводник мог усиливать излучение. Для этого надо получить инверсную заселённость «рабочих уровней», в качестве которых здесь выступают нижний край зоны проводимости и верхний край валентной зоны. Концентрация электронов у нижнего края зоны проводимости (т.е. на верхнем «рабочем уровне») должна быть больше, чем у верхнего края валентной зоны (на нижнем «уровне»). Инвертированный полупроводник характеризуется достаточно высокой концентрацией электронов у нижнего края зоны проводимости и соответственно высокой концентрацией дырок у края валентной зоны; такие полупроводники называют *вырожденными*. Заметим, что могут быть полупроводники, вырожденные только по электронам проводимости или только по дыркам. В рассмотренных выше чистых, или беспримесных, полупроводниках возможно лишь одновременное вырождение – и по электронам, и по дыркам.

Внесение в полупроводниковый кристалл тех или иных примесей существенно изменяет его свойства. Примеси бывают разные. Атомы одних примесей легко отдают в зону проводимости по одному из своих электронов; такие примеси называют *донорными*, а полупроводники с такими примесями – *n*-полупроводниками. Атомы других примесей, напротив, захватывают по одному электрону из валентной зоны; это *акцепторные* примеси и соответственно полупроводники *p*-типа, или *p*-полупроводники.

Для создания инверсии можно привести в контакт друг с другом два вырожденных полупроводника разного типа: *n* – полупроводник и *p* – полупроводник (создать так называемый *p-n – переход*). Известно, что *p-n – переход* обладает свойством односторонней проводимости, потому и усиливающий элемент такого типа часто именуют *лазерным диодом*. К области контакта прикладывается электрическое напряжение так, как изображено на рисунке 4, *а*. Под действием поля электроны из *n* – полупроводника будут перемещаться (инжектировать), в эту же область будут инжектировать дырки из *p* – полупроводника. В указанной области развернётся рекомбинация – там будут происходить переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону. На этих переходах при наличии оптического резонатора возможна лазерная генерация. Таков принцип работы полупроводниковых лазеров, называемых *инжекционными* (схема приведена на рисунке 4, *б*). Энергия когерентного излучения здесь черпается за счет энергии источника тока, подключенного к контакту разнородных примесных полупроводников.

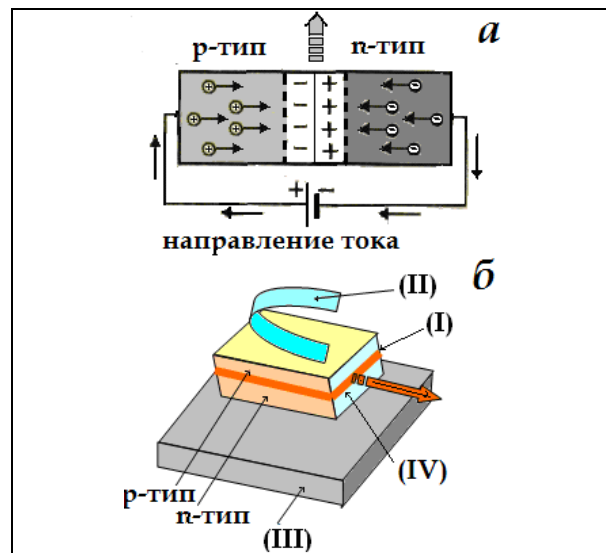


Рисунок 4 - Принципиальное устройство инжекционного полупроводникового лазера

- а) схема инъекции носителей заряда в области контакта;
- б) схема расположения элементов в лазере:

(I) - область $p-n$ -перехода (активный слой лазерного диода), (II) – верхний электрод, (III) – нижний электрод; плоский резонатор образован обеими отполированными гранями (IV) диода, ориентированными перпендикулярно плоскости $p-n$ – перехода. Стрелками указано направление вывода излучения

Широко применяется инжекционный лазер на арсениде галлия ($GaAs$). Вырожденный n -полупроводник получают при внесении в $GaAs$ примеси теллура; концентрация примеси примерно $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Вырожденный p -полупроводник получается при внесении в $GaAs$ примеси цинка; концентрация примеси порядка 10^{19} см^{-3} . Генерация происходит на длинах волн от 0,82 до 0,9 мкм. Инжекционные лазеры отличаются своей миниатюрностью; линейные размеры граней полупроводникового активного элемента могут составлять всего 1 мм. Толщина излучающей области (области $p-n$ -перехода) равна 2 мкм. Мощность излучения такого лазера порядка 10 мВт в непрерывном режиме. Ввиду особой компактности и высокой надёжности инжекционные лазеры оказалось выгодным использовать в современных системах передачи и обработки информации. Один из разработанных в последнее время инжекционных лазеров, применение которого стремительно развивается – лазер на основе нитрида галлия (GaN), излучающий в зеленой части видимого спектра с низким поглощением мощности свечения в воздухе и в воде. Инжекционные лазеры характеризуются высоким КПД, который может составлять 50 – 70%. Применение находят и другие лазеры на полупроводниковых кристаллах, например, лазеры с накачкой электронным пучком.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ МОДУЛИРОВАННОЙ ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА

Временной ход генерации лазера приближённо можно описать в представлениях так называемой *балансно-вероятностной модели* взаимодействия элект-

ромагнитного поля оптического излучения, усиливаемого в инверсной среде, помещенной внутри открытого резонатора. Модель представляет динамическую систему дифференциальных уравнений и образующими её уравнениями устанавливается баланс мощности, выделившейся в лазерном резонаторе в виде светового излучения, и мощности, запасённой в среде в ходе процесса накачки. Основные положения, приводящие к формулировке этой модели, состоят в следующем.

Во-первых, усиление в среде существует за счет инверсной заселенности, создаваемой в ходе процесса накачки – то есть перевода атомов, образующих среду, при поглощении ими энергии возбуждающего излучения в состояние с большей энергией. За счёт накачки происходит увеличение населенности верхнего возбуждённого состояния с последующим заселением ими метастабильного уровня. Тем самым в среде создаётся возможность усиления поля излучения.

Во-вторых, требуемый для старта генерации уровень усиления должен превышать сумму потерь, называемых вредными, из-за рассеяния и поглощения энергии усиливаемого излучения в активной среде и так называемых полезных потерь (снижение энергии из-за выхода излучения сквозь полупрозрачные зеркала открытого резонатора). При равенстве усиления и суммарных потерь мощности говорят о достижении *порогового уровня усиления*. В условиях незначительного превышения усиления над потерями и стартует генерация. Скорость усиления будет определяться разностью показателя усиления, обусловленного инверсной заселённостью, и обоих видов потерь.

Добротность резонатора характеризует его способность обеспечить обратную связь, давая возможность поддерживать непрерывным процесс генерации. Величина потерь является, в свою очередь, основной характеристикой добротности. Режим работы лазера, при котором добротность неизменна, называют *свободным*. Типичным для этого режима будет переходный процесс – от осцилляций интенсивности, возникающих на первом этапе, к установившемуся (т.е., неизменному во времени, или стационарному) свечению. Примерный ход такого процесса в эксперименте воспроизводит рисунок 5.

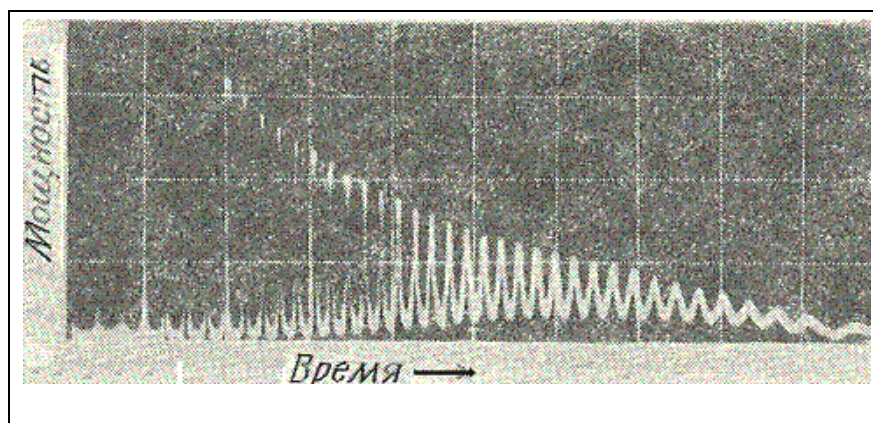


Рисунок 5 - Осциллограмма интенсивности, излучаемой в режиме свободной генерации, лазером на люминесцентном кристалле. Временной интервал примерно соответствует 0.4 мс

Наблюдаемые на первом этапе генерации пульсации объясняются, в основном, тем, что усиление в ходе вынужденного испускания ослабевает – происходит насыщение инверсии. Скорость накачки может быть относительно невысокой, интенсивность излучения снижается (до тех пор, пока не будет достигнут за счет накачки прежний уровень усиления), затем снова нарастает. Равновесие скоростей изменения интенсивности и инверсии, означающий установление стационарного режима, достигается за конечный интервал, на котором выходная интенсивность, как правило, испытывает осцилляции.

Применение лазеров часто требует значительной пиковой мощности свечения, высокой временной концентрации энергии в коротких световых импульсах, излучения в форме продолжительной серии коротких периодических импульсов без затухания. Принцип действия лазеров позволяет реализацию этих практически важных режимов излучения – сохранить незатухающими или резко усилить импульсы и сжать во времени, возникающие в переходном процессе. Один из приёмов их достижения носит название *модуляции добротности резонатора*. Он заключается в создании условий для более или менее продолжительной задержки начала генерации с тем, чтобы в усиливающем элементе стало возможным большее накопление инверсных частиц. Их когерентное высвечивание формирует интенсивный всплеск выходного излучения – так называемый лазерный моноимпульс, реально проявляющийся как короткая предельно мощная вспышка света. Такие импульсы используются в лазерных радарных (лидарных) системах поиска и раннего обнаружения или в оборонных комплексах нейтрализации техники слежения и наведения у противника. Периодическое изменение добротности (модуляция потерь в резонаторе, например, за счёт изменения поглощения в оптическом затворе, дополнительно размещённом в резонаторе) может стимулировать развитие режима незатухающих в течение действия накачки регулярных импульсов. Инжекционные лазеры, работающие в таком режиме, используются в системах передачи и обработки информации.

Вещество оптического затвора представляет собой среду, атомы которой характеризуются двумя рабочими энергетическими уровнями и способны поглощать излучение так, что резонансная частота поглощения близка к частоте генерации. Резонансное поглощение может насыщаться, поэтому пропускание среды зависит от мощности проходящего излучения – при значительном уровне интенсивности среда *просветляется*, затвор начинает в большей степени пропускать излучение. Потери в резонаторе снижаются, его добротность изменяется, в этих условиях и происходит формирование моноимпульса. Просветляющийся затвор (его также называют *пассивным*) в лазерах на кристаллах представляет собой также кристалл или кювету с жидкостью, размещённую внутри резонатора на одной оси с активным элементом. В полупроводниковых лазерах затвором может служить тонкая пленка с насыщающимся поглощением, нанесённая на один из торцов диода.

Уравнения, описывающие баланс мощности выходного излучения и запасаемой в инверсной среде мощности, которая обеспечивает процесс усиления,

называют *скоростными* или *кинетическими*. В самом простом виде они представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений для интенсивности I и инверсии n в усиливающей среде:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \frac{1}{\tau} \left(n - \frac{\kappa}{1 + \sigma I} \right) I, \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{1}{\tau_1} [\alpha - \kappa + I - \sigma n]. \end{aligned}$$

Интенсивность пропорциональна квадрату напряженности поля лазерного излучения и является характеристикой, значение и скорость изменения которой относительно просто может быть измерено в эксперименте, поэтому при моделировании динамики лазера обычно анализируют временной ход именно этой переменной. Величины интенсивности и инверсии в системе (1) нормированы, т.е. их значения не имеют размерности, их выражают отношениями соответственно для I – к величине мощности насыщения, для n – к уровню инверсной заселённости, отвечающему пороговому усилению. Далее в (1): α – параметр накачки (по отношению к пороговому уровню, τ_1 – время спонтанной релаксации метастабильного уровня; величину τ называют временем жизни фотона в резонаторе, значением скоростного параметра $1/\tau$ учитывается длина резонатора и суммарные потери излучения (кроме резонансных, в среде затвора). Компонента $\kappa/(1 + \sigma I)$ в первом из уравнений (1) определяет переменное резонансное поглощение в среде просветляющегося затвора, здесь κ – показатель ненасыщенного резонансного поглощения, величиной σ характеризуется различие в скорости насыщения инверсии и резонансного поглощения, бóльшая скорость насыщения в веществе затвора – одно из основных условий формирования моноимпульсов в режиме модулированной добротности резонатора, поэтому $\sigma > 1$. Уравнения (1) нелинейны (вероятность вынужденного перехода зависит от интенсивности) – правая часть обоих соотношений содержит произведение переменных nI . Поэтому система (1) не допускает точного аналитического решения. Переменные $I(t)$ и $n(t)$ как неизвестные функции определяется путем численного интегрирования. Интегрирование уравнений (1) и графическое построение зависимостей $I(t)$ и $n(t)$ проводится с помощью прикладной программы расчёта PrSelf_2.

4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИКЛАДНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 11

Чтобы начать работу с программой требуется запустить ярлык с иконкой



программы на рабочем столе. Для этого мышью переместите курсор ← на иконку и щелкните 2 раза левой клавишей мыши. На экране появится окно (рисунок 6,а), на рабочем поле которого

слева – графическая зависимость интенсивности от времени для произвольного набора значений коэффициентов интегрируемой системы (1), справа – ячейки с указанием наименования коэффициентов (1): α (alpha), отношения τ_1/τ (tau1/tau), κ (карра), σ (сигма) и отрезка времени (временного диапазона расчёта): t_1 (начало

отрезка), t_2 (конец отрезка), Также в этом ряду указаны необходимые при интегрировании начальные значения переменных I (Y_0) и n (y_0), последнее из вводимых данных – количество точек (параметр точности расчёта).

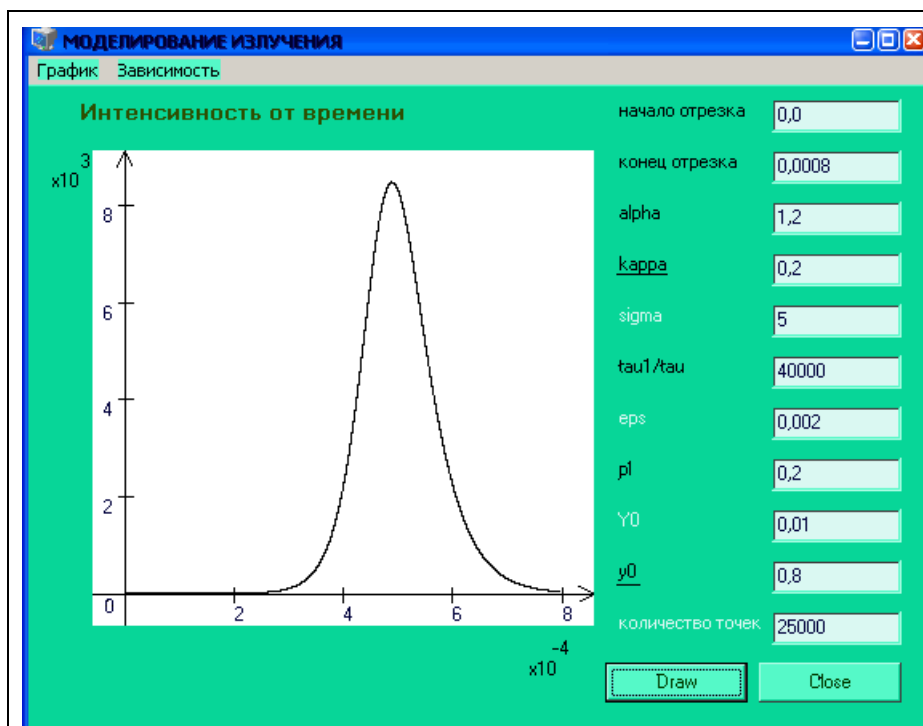


Рисунок 6 а) - Вид окна прикладной компьютерной программы PrSelf_2

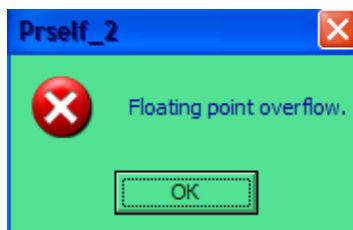


Рисунок 6 б) - Предупреждение о необходимости повысить точность расчёта

Необходимо отметить то, что масштаб времени нормирован по величине τ_1 . Таким образом, если для τ_1 выбирается, например, значение $1 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 1 \text{ нс}$, то задание числа $t_2 = 10$ подразумевает расчёт в пределах 10 нс .

Набор чисел в ячейках проводится после соответствующей установки курсора, десятичная мантисса вводится через запятую. Когда набор входных данных завершён, курсор устанавливается на виртуальную клавишу Draw, после её нажатия левой клавишей мыши должен появиться график рассчитанной функции $I(t)$ или $n(t)$ в рабочем поле программы (слева). В зависимости от установленной точности расчёт происходит в течение некоторого интервала времени, поэтому график может проявиться не сразу. Может оказаться, что расчёт с введенной точностью нереализуем, тогда в окне программе появляется предупреждение (ри-

сунок 6,б). Программу необходимо закрыть (нажатием мышью виртуальной клавиши Close) и снова запустить, повторить набор требуемых входных данных, повысив при этом точность увеличением в несколько раз (возможно, на порядок и более) входного параметра количество точек, и повторить попытку расчёта.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

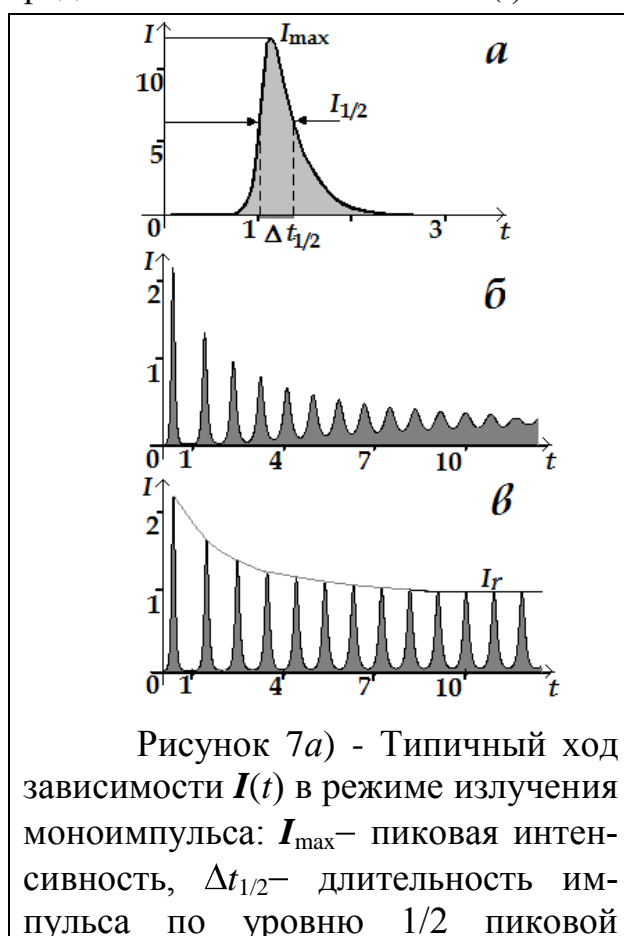
В рамках численного решения задачи рассматривается временной ход генерации света в режиме модулированной добротности резонатора. Лазеры отличаются по типу рабочих сред – этим различается схема их устройства и назначение во всевозможных практических применениях. Излучение в режиме модулированной добротности резонатора, как и свободное свечение, по характеру протекания и основным характеристикам (пиковой мощности и длительности импульсов) может сильно отличаться в силу различия сред, диапазона излучаемых частот и рабочих схем лазеров. Набору технических параметров лазерной схемы (достижимому усилению активного элемента, уровню мощности накачки, начальному пропусканию затвора, длине резонатора, прозрачности зеркал) соответствуют сочетания значений таких коэффициентов модели (1) как τ , τ_1 , α и κ . Исследуемый процесс представляет собой формирование интенсивности лазерного излучения в виде отдельного короткого светового импульса в случае, если усиливающим элементом является люминесцентный кристалл (рубин или алюмоиттриевый гранат). В последнем случае инверсия формируется по четырёхуровневой схеме, поэтому достижимое в гранате усиление значительно выше. Соответственно такой лазер излучает более интенсивные и короткие импульсы. В инжекционном лазере модуляция потерь за счёт тонкой просветляющейся пленки на торце лазерного диода определяет развитие процесса автоколебаний интенсивности. С ростом уровня модуляции (увеличением κ) зависимость в виде затухающих осцилляций сменяется серией контрастных регулярных импульсов.

Основным заданием, выполняемым в ходе работы, являются расчет зависимости $I(t)$ для разных типов лазеров с помощью прикладной компьютерной программы PrSelf_2. В начале расчётов в ячейках для переменных начало отрезка, eps, Y0 следует установить такие значения, как на рисунке 6, а и не изменять их. Далее для каждого из трёх вариантов в ячейках – конец отрезка, alpha, tau1/tau, sigma, rho надо установить значения из таблицы 1 (значение tau1/tau вычисляется по заданным τ , τ_1). После этого проводится последовательный расчёт зависимости $I(t)$ для нарастающего ряда величин показателя κ в ячейке каппа (всего — 7-8 значений в пределах указанного в таблице 1 диапазона), при этом также требуется в той же пропорции увеличивать значения параметра начальной инверсии в ячейке y0 (в случае невозможности реализации расчёта и получения предупреждения – поступить так, как указано в правилах обращения с программой, изменив содержимое ячейки количество точек).

Таблица 1 – Значения параметров лазеров (для разных активных сред)

активная среда	рубин	алюмо-иттриевый гранат	<i>GaAs</i>
длина волны, м	$6.94 \cdot 10^{-7}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$8.50 \cdot 10^{-7}$
параметр τ , с	$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-12}$
параметр τ_1 , с	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-9}$
скорость накачки α	1.20	1.10	1.32
параметр σ	5	8	10
параметр ρl	0.2	1.5	3.2
диапазон κ	0.2 ... 3.7	3.5 ... 7.0	0.11...0.18
диапазон y_0	0.8 ... 3.6	3.4 ... 9.0	0.05
конец отрезка	0.0008	0.001	20.0
точность (не менее)	80000	40000	25000

Для каждого из вариантов, соответствующих лазерам на кристаллах, по графику с точностью до двух значащих цифр надо измерить и занести в таблицу 2 величину пиковой интенсивности I_{\max} и длительность импульса $\Delta t_{1/2}$. На рисунке 7,а указано, как определяются на зависимости $I(t)$ их значения.



интенсивности;

б) - Затухающая серия импульсов, излучаемых инжекционным лазером;

в) - Серия импульсов инжекционного лазера, переходящая в режим автоколебаний: I_r – пиковая интенсивность регулярных импульсов

Таблица 2 – Расчётные данные

Лазер на рубине			<i>Nd:YAG</i> – лазер			<i>GaAs</i>	
	max	$t_{1/2}$		max	$t_{1/2}$		r
1			1			1	
2			2			2	

По данным таблицы 2 для этих двух типов лазера строится график зависимости пиковой мощности I_{\max} и полуширины импульса $\Delta t_{1/2}$ от уровня модуляции добротности резонатора, т.е., от величины показателя начального поглощения κ в веществе пассивного затвора. Для инжекционного лазера следует приблизительно установить пороговое значение κ , начиная с которого генерация лазера из свободного режима, подобного тому, что изображён на рис. 7,б, переходит в режим автоколебаний интенсивности (рис. 7,в), отметив это в таблице 2. Далее по данным таблицы 2 необходимо построить график зависимости пиковой интенсивности импульсов I_r после их регуляризации (рис. 7,в) от показателя поглощения κ . Убедиться в том, что с увеличением уровня модуляции добротности резонатора возрастает пиковая мощность лазерных импульсов и снижается их длительность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

- 1 Назвать и пояснить назначение основных элементов устройства лазера.
- 2 Почему в двухуровневой энергетической схеме активной среды невозможно создание инверсной заселённости?
- 3 Пояснить различия в формировании инверсии в условиях трёхуровневой и четырёхуровневой энергетической схемы.
- 4 Объяснить роль открытого резонатора в схеме лазера.
- 5 Каковы основные условия старта генерации лазера? Что понимают под пороговым уровнем усиления?
- 6 Указать основное отличие в процессах вынужденного излучения в люминесцентных кристаллах и полупроводниках.
- 7 Что представляет собой усиливающий элемент в инжекционном полупроводниковом лазере?
- 8 В чём состоит различие режимов свободной генерации и модулированной добротности резонатора лазера?
- 9 Пояснить принцип действия и назначение просветляющегося затвора.
- 10 Как изменяются характеристики лазерного излучения с изменением начального показателя поглощения в затворе.
- 11 Указать основные свойства лазерного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Общие требования и правила оформления учебных текстовых документов: СТП СМК 4.2.3-01-2011. - Введ. 2011-04-07. - Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2011. – 43 с.
- 2 Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2007. – 558 с.
- 3 Манак И.С. Квантовая радиофизика / И.С. Манак, Е.Д. Карих. – Минск: Изд. центр БГУ, 2009.
- 4 Квантовая электроника : Маленькая энциклопедия / Под ред. М.Е. Жаботинского и др. – М.: Советская энциклопедия, 1991.

Учебное издание

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА**

Методические указания

Составители

доктор физ.- мат. наук Юревич В.А.,
кандидат физ.- мат. наук Тимощенко Е.В.,
ассистент Юревич Ю.В.

Редактор А.А. Щербакова
Технический редактор Т.В Багуцкая

Подписано в печать Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Тираж ___ экз. Заказ _____

Учреждение образования «Могилёвский государственный университет продо-
вольствия».

ЛИ №02330/0131913 от 08.02.2007.
пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв.

Отпечатано в учреждении образования «Могилёвский государственный универ-
ситет продовольствия».

пр-т Шмидта, 3, 212027, Могилёв.