

1. Нелинейная оптика.

1.1 Общие понятия

Нелинейная оптика-это раздел физики, который изучает явления взаимодействия света и вещества, которые протекают по разному в зависимости от интенсивности света. В этом разделе физики рассматриваются вещества, у которых имеется нелинейная зависимость вектора поляризации от вектора напряженности электрического поля световой волны. Для большинства веществ такая нелинейность может наблюдаться лишь при очень высоких интенсивностях света. Такие интенсивности достигаются при помощи лазеров.

Взаимодействие или процесс называются линейными, если их вероятность пропорциональна первой степени интенсивности излучения. Если же эта степень больше единицы, они называются нелинейными.

1.2 Лазеры и развитие нелинейной оптики

В начале 60-х годов были созданы принципиально новые источники света, основанные на явлении вынужденного излучения в квантовой системе, которые получили название оптических квантовых генераторов – (ОКГ), или лазеров.

Главное отличие ОКГ от традиционных тепловых и газоразрядных источников света состоит в том, что генерируемое ими излучение характеризуется большой пространственной и временной когерентностью, высокой монохроматичностью и направленностью.

Появление нелинейной оптики стало связано именно с разработкой лазеров, которые смогли генерировать свет с большой напряженностью электрического поля, сравнимой с напряженностью микроскопического поля в атомах.

Существуют две основные причины, которые вызывают различия в воздействии излучения большой интенсивности от излучения малой интенсивности на вещество. Во-первых, при большой интенсивности излучения главную роль играют многофотонные процессы, когда в элементарном акте поглощается несколько фотонов. А во-вторых, при большой интенсивности излучения возникают эффекты самовоздействия, приводящие к изменению исходных свойств вещества под влиянием излучения.

Нелинейная оптика изучает целый ряд физических явлений, таких как генерация оптических гармоник, выпрямление света, вынужденное рассеяние

света, самофокусировка световых пучков.

2. Генерация второй гармоники

Рассмотрим подробнее явление генерации второй оптической гармоники. Суть этого явления состоит в удвоении частоты света при прохождении мощного лазерного пучка в кристалле. Этот эффект был первым, который был обнаружен вскоре после создания лазера. Основной схемой для получения второй оптической гармоники служит схема опыта Франкена представленная на следующем рисунке.

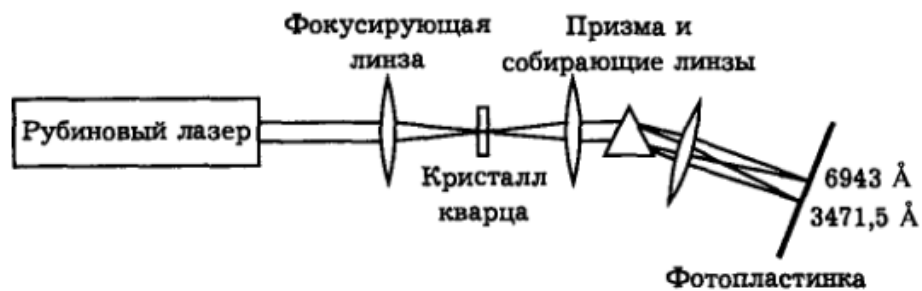


Рис. 1. Схема Франкена для генерации второй гармоники.

В этой установке излучение рубинового лазера фокусировалось в кристалл кварца. Далее излучение, которое выходило из кристалла, разворачивается в спектр с помощью дисперсионной призмы и фокусировалось на фотопластинку. Результатом опыта являлось следующее наблюдение: помимо света на частоте лазера из кристалла выходил свет на удвоенной частоте, так называемая, вторая гармоника. В опыте, который поставил Франкен, излучение второй гармоники было чрезвычайно слабым, но этот опыт сыграл важную роль в развитии нелинейной оптики и положил начало развитию этой науки.

Опыты проведенные в дальнейшем показали, что при использовании других кристаллов можно добиться колоссального повышения эффективности генерации второй гармоники. В настоящее время уже разработаны методы, которые позволяют преобразовать во вторую гармонику значительную часть лазерного излучения. В единичных случаях удавалось получить коэффициент полезного действия генерации близкий к 100%.

Генерация второй гармоники была впервые продемонстрирована в 1961 году. Сегодня этот нелинейно-оптический эффект широко применяется для преобразования частоты лазерного излучения.

3. Нелинейная поляризация

Взаимодействие световой волны с веществом описывается вектором поляризации \mathbf{P} . В линейной оптике поляризация связана линейно с напряженностью электрического поля \mathbf{E} световой волны

$$\mathbf{P} = \chi \mathbf{E} \quad (1)$$

Такая связь является приближенной. Для того, чтобы судить о применимости этого соотношения, надо сравнить \mathbf{E} с напряженностью внутриатомного поля \mathbf{E}_a , определяющего степень связи атомов или молекул в веществе. Величину \mathbf{E}_a можно подсчитать по закону Кулона: $E_a = \frac{e}{r_0^2}$, где r_0 -характерный радиус электронной орбиты. Подставляя $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $r_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м, получаем $E \approx 10^9$ В/см, что является максимальной величиной внутриатомного поля, определяющего силу связи, действующего на оптический электрон в атоме водорода. В полупроводниках, где внешние (оптические) электроны экранированы, \mathbf{E}_a значительно слабее и составляет $10^7 - 10^8$ В/см. С другой стороны, если к образцу прикладывается поле, напряженность которого составляет приблизительно 10^3 В/см, то оно будет значительно меньше внутриатомного поля. И следовательно, указанная выше формула будет применима. Использование лазеров нарушит справедливость формулы (1).

При определенных условиях, одним из которых является высокая когерентность излучения, волна может претерпеть значительные нелинейные искажения и, в частности, преобразоваться в волну второй гармоники. Появление второй гармоники связано с квадратичным членом в разложении поляризации \mathbf{P} по степеням электрического поля световой волны

$$\mathbf{P} = \chi_{ij}^{(1)} E_j + \chi_{jk}^{(2)} E_j E_k + \dots \quad (2)$$

Для гармонических колебаний поля световой волны $\mathbf{E} = E_0 \cos \omega t$ получим из вышеуказанной формулы поляризацию на удвоенной частоте

$$\mathbf{P} = \chi E^2 = \chi E_0^2 \cos^2 \omega t = \frac{\chi E_0^2}{2} + \frac{\chi E_0^2}{2} \cos 2\omega t \quad (3)$$

4. Магнитоиндуцированные нелинейно-оптические эффекты

На оптические свойства среды будут оказывать влияние тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$. Рассмотрим оптически изотропный ферромагнетик при наличии намагниченности \vec{M} . Намагниченность будет понижать симметрию ферромагнетика до одноосновной.

Существует отдельный тип магнитоиндуцированных эффектов, которые называются магнитооптическими эффектами Керра. Они проявляются при отражении света от поверхности намагниченного материала. Существуют три типа таких эффектов, которые различаются геометрией эксперимента: экваториальный, меридиональный и полярный эффекты Керра. Экваториальный эффект проявляется в изменении интенсивности и сдвиге фаз линейно поляризованной волны при отражении от поверхности образца. При меридиональном и полярном эффектах Керра плоскость поляризации вращается и появляется эллиптичность при отражении линейно поляризованной волны.

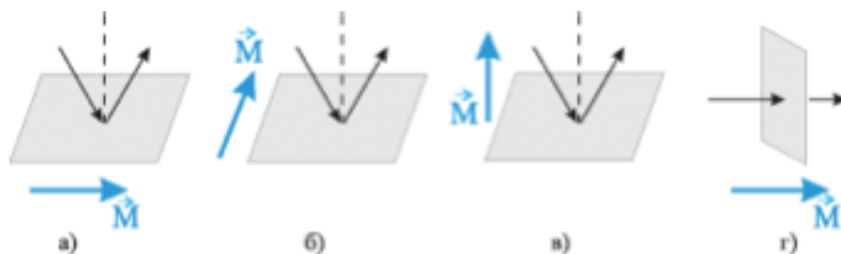


Рис. 2. Геометрия эксперимента при наблюдении эффекта Керра.

Сегодня известно, что в средах с макроскопической намагниченностью, то есть в ферромагнетиках и парамагнетиках, которые находятся в насыщающем внешнем поле, возможна генерация магнитоиндуцированной второй гармоники. При этом при преобразовании полярного базиса вектор намагниченности \vec{M} не будет меняться. То есть инверсная симметрия среды не будет нарушаться. Именно поэтому магнитоиндуцированная квадратичная поляризация может возникнуть только в нецентросимметричных средах. \vec{M} будет менять знак при инверсии времени, что и будет обуславливать явление генерации магнитоиндуцированной второй гармоники.

В случае присутствия намагниченности у среды нелинейная поляризация второго порядка будет состоять из двух слагаемых. Первое будет отвечать за кристаллографический вклад, а второе будет отлично от нуля только в присутствии намагниченности.

$$\chi(\pm M) = \chi^{cryst} \pm \chi^{odd}(\pm M) \quad (4)$$

Вышеупомянутый нелинейный магнитооптический эффект Керра будет наблюдаться и в случае генерации отраженной магнитоиндуцированной второй гармоники. Этот эффект будет выражаться во вращении плоскости поляризации или изменении интенсивности генерации второй гармоники под действием приложенного к образцу магнитного поля.

5. Лазеры

5.1 Основы работы.

В середине прошлого века были созданы новые источники света, основанные на явлении вынужденного излучения в квантовой системе, которые получили название лазеров. Слово «лазер» является аббревиатурой от английского Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, т.е. усиление света посредством вынужденного испускания излучения.

Как уже было упомянуто выше, ОКГ характеризуется большой пространственной и временной когерентностью, а также высокой монохроматичностью и направленностью. Работа лазера основана на трех фундаментальных идеях.

Первая из них связана с использованием вынужденного испускания света атомами. Оно было предсказано Эйнштейном при анализе формулы Планка для излучения. Известно, что все вещества представляют собой атомные системы, которые можно характеризовать квантовыми состояниями (уровнями) с дискретными значениями энергии. Состояние атома, соответствующее наименьшей энергии, называется основным, а все остальные – возбужденными.

В основном состоянии электрон находится ближе всего к ядру и притяжение между ними максимально. Соответственно, и энергия этого состояния максимальна и равна работе, необходимой для удаления электрона от ядра на бесконечное расстояние. Атом при этом превращается в ион, поэтому эта энергия называется энергией (потенциалом) ионизации и имеет отрицательный знак.

Номер энергетического уровня обозначается главным квантовым числом. Чем больше номер уровня, тем ближе атом к состоянию ионизации и тем меньше расстояние между соседними уровнями. Возбужденные состояния атома нестабильны. С течением времени атом по разным причинам переходит в основное состояние с минимумом потенциально энергии.

Возможны также переходы с одного энергетического уровня на другой. Вынужденным, или индуцированным, называется излучение фотонов, при котором

атомы (или молекулы) под действием света переходят из возбужденного состояния в невозбужденное.

Вторая идея, лежащая в основе работы лазера, заключается в использовании термодинамически неравновесных систем, в которых возможно усиление, а не поглощение света. В обычных условиях при термодинамическом равновесии населенность атомных уровней подчиняется закону Больцмана, согласно которому на более высоком уровне при любой температуре находится меньше атомов, чем на низком. Для того, чтобы излучение усиливалось, в среде должно иметь место обратное неравенство (инверсная населенность).

Далее, лазер использует положительную обратную связь для превращения усиливающей системы в генератор когерентного излучения. Для ее реализации активную среду помещают в оптический резонатор, который обычно состоит из двух плоских или сферических зеркал. При использовании резонатора часть генерируемого излучения остается внутри рабочего вещества и вызывает вынужденное испускание все новыми и новыми возбужденными атомами.

5.2 Процессы взаимодействия излучения с веществом.

Я перейду к более подробному рассмотрению процессов взаимодействия излучения с веществом и усиления света, а также рассмотрению оптических резонаторов. Рассмотрим вначале элементарные процессы взаимодействия излучения с веществом. Пусть мы рассматриваем излучение, взаимодействующее с атомами, которые имеют всего два уровня энергии – E_1 и E_2 .

5.3 Поглощение света.

В процессе поглощения света поглощается фотон с энергией $h\nu_{12}$, атом совершает квантовый переход $E_1 \rightarrow E_2$. Вероятность данного процесса, отнесенная к единице времени равна

$$W_{12} = B_{12}u_\nu, \quad (5)$$

где B_{12} – второй коэффициент Эйнштейна или коэффициент Эйнштейна для поглощения, u_ν – спектральная плотность поглощаемого излучения. Спектральная плотность поглощаемой мощности при этом равна

$$P_{12}^{\text{погл}} = B_{12}u_\nu N_1 h\nu \quad (6)$$

где – N_1 число атомов на уровне с энергией E_1 .

5.4 Спонтанное излучение.

Спонтанное излучение происходит при самопроизвольном переходе с более высокого уровня E_2 на более низкий E_1 . Направление, фаза и поляризация вылетающего при спонтанном излучении кванта имеют случайные значения. Энергия и длина волны определены разницей энергий перехода. Вероятность рассматриваемого процесса отнесенная к единице времени называется первым коэффициентом Эйнштейна A_{21} . Эта величина является постоянной и относится к конкретному квантовому переходу.

Для системы, пребывающей в возбужденном состоянии E_2 , где находится N_2 невзаимодействующих атомов, спектральная плотность мощности спонтанного испускания вычисляется по формуле

$$P_{21}^{сп} = A_{21}N_2h\nu_{21}. \quad (7)$$

5.5 Вынужденное (индуцированное) излучение.

В случае вынужденного излучения испускание фотона вызывается уже существующим полем излучения. Подобно спонтанному излучению атом переходит из состояния E_2 в состояние E_1 . Вероятность такого перехода в единицу времени пропорциональна плотности энергии внешнего электромагнитного поля u_ν на частоте перехода ν_{21} и некоторому коэффициенту B_{21} , характеризующему вероятность излучения атома

$$W_{21}^B = B_{21}u_\nu \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности B_{21} называется коэффициентом Эйнштейна для вынужденного излучения. Он зависит только от свойств атомной системы. При этом, спектральная мощность вынужденного испускания равна

$$P_{21}^B = B_{21}u_\nu N_2h\nu_{21} \quad (9)$$

У индуцированных переходов существует ряд важных свойств. Во-первых, вероятность индуцированных переходов отличается от нуля только для случая, когда энергия кванта внешнего светового поля $h\nu$ совпадает с разностью энергий двух рассматриваемых состояний системы. Во-вторых, кванты электромагнитного поля излучения при таких переходах тождественны квантам поля, вызывающим эти переходы. И наконец, вероятность индуцированных переходов в единицу времени пропорциональна плотности энергии внешнего поля в единичном спектральном интервале.

5.6 Инверсная населенность.

В среде с двумя уровнями энергии $E1$ и $E2$, между которыми возможен индуцированный переход, существуют атомы имеющие энергии как $E1$, так и $E2$. Поэтому фотон с частотой $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$, сталкиваясь с атомами на уровне $E2$, будет порождать новый фотон, а сталкиваясь с атомом на уровне $E1$, будет поглощаться. Следовательно, поток фотонов, проходящий через среду, будет усиливаться или ослабляться, в зависимости от того на каком из уровней $E2$ или $E1$ будет находиться больше атомов.

Из распределения Больцмана известно, что в условиях теплового равновесия и при отсутствии вырождения уровней $N1 > N2$. В этих условиях энергия излучения, падающего на вещество, только поглощается.

Но термодинамическое равновесие возможно нарушить и сделать так, чтобы $N1 < N2$. Физически это означает, что мощность излучения, выходящая из вещества, больше, чем подводимая к веществу. В этом случае происходит усиление света, проходящего через вещество, которое называют активным.

Таким образом, главная задача при создании лазера – обеспечить такие условия, когда термодинамическое равновесие нарушается и частиц с энергией $E2$ становится больше, чем с энергией $E1$. Такое состояние среды называется инверсной населенностью, а процесс называется накачкой.

5.7 Усиление света в инверсной среде.

Рассмотрим среду с инверсной населенностью. Направим на нее поток квантов с энергией $h\nu = E2 - E1$.

Часть квантов будет поглощаться атомами, находящимися на уровне $E1$ и переводить их в возбужденное состояние. Другая часть пройдет без всякого взаимодействия со средой, не изменяя ее и свое состояние. Оставшиеся кванты взаимодействуют с атомами, находящимися в возбужденном состоянии, переводя их на уровень $E1$ с и вынуждая излучить еще один квант.

Вероятности вынужденного перехода сверху вниз и снизу вверх одинаковы, а количество атомов на верхнем уровне выше, чем на нижнем. Так что по мере прохождения количество квантов будет увеличиваться. Это приведет к усилению излучения. Излучение будет монохроматичным, так как все кванты имеют одну и ту же частоту $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, и когерентным, то есть будут иметь одинаковую фазу. Таким образом, будет наблюдаться усиление света за счет вынужденного испускания излучения. Характерным для лазерного излучения как раз является монохроматичность и когерентность.

Сегодня существует множество типов лазеров. Два главных параметра, определяющих тип лазера – это активная среда и способ накачки.

5.8 Накачка.

Чтобы создать среду, где $N_2 > N_1$, необходимо иметь внешний источник энергии, обеспечивающий накачку. Этот источник энергии будет переводить атомы среды на верхний уровень. При этом величина создаваемой инверсии будет увеличиваться с увеличением мощности накачки. Для создания инверсионной населенности в различных активных средах используются различные способы накачки.

Наиболее распространены оптическая и электрическая накачки. Оптическая накачка осуществляется путем облучения активного элемента лазера мощным импульсным или непрерывным излучением специальных ламп накачки, либо излучением другого лазера. Она применяется в основном в твердотельных, допустим рубиновых, активированных, стеклянных, и жидкостных лазерах.

Как уже было сказано, необходимым условием усиления излучения является наличие инверсионной населенности. Рассмотрим, что будет происходить со средой с увеличением интенсивности излучения. В стационарном случае, когда время рассмотрения свойств среды значительно больше времени переходных и релаксационных процессов, инверсия населенности уровней определяется кинетическим балансом между верхним и нижним уровнями.

Верхний уровень заселяется за счет накачки и вынужденного поглощения и расселяется за счет вынужденного излучения. Нижний уровень заселяется за счет вынужденных переходов с верхнего уровня и расселяется за счет релаксационных переходов.

При малых уровнях входного излучения скорость накачки превышает скорость расселения верхнего уровня за счет вынужденных переходов, а скорость релаксации нижнего превышает скорость его заселения. То есть, поддерживается максимально возможная инверсионная населенность. Она позволяет значительно усилить входное излучение.

При большой интенсивности излучения, верхний уровень будет опустошаться с увеличением интенсивности излучения. В то же время скорость накачки будет постоянной, так как она ограничена конструкцией лазера и свойствами среды. Так что в этой ситуации населенность верхнего уровня уменьшается по сравнению со случаем слабого излучения.

При определенной интенсивности излучения населенности верхнего и нижнего уровня станут одинаковыми, и инверсия пропадает. Среда перестанет быть усиливающей. В зависимости от расстояния, пройденного излучением в

активной среде, его интенсивность увеличивается вначале экспоненциально, затем скорость роста интенсивности уменьшается, она достигает максимального значения.

Целью данной курсовой работы является ознакомление с экспериментальными методами исследования нелинейно-оптических эффектов. На установке, принцип действия которой я изучала, использовался титан-сапфировый лазер. Такой лазер является примером лазеров сверхкоротких импульсов. Основной частью данного лазера является активная среда, но в отличие от других лазеров его активная среда должна обладать достаточным усилением в широкой спектральной области.

Работа титан-сапфирового лазера происходит следующим образом. Сначала включают лазер накачки и повышают мощность до порога генерации. Затем для начала генерации УКИ необходим небольшой толчок основания одной из призм установки для того, чтобы создать флуктуационные выбросы. На начальном этапе длительность таких флуктуационных выбросов обратно пропорциональна ширине линии усиления. После двух тысяч проходов длительность флуктуационных выбросов начинает возрастать. Это связано с большим усилением мод, расположенных в центре линии усиления. В конце концов, наибольший флуктуационный выброс достигает такой интенсивности, что заметную роль в его поведении начинают оказывать нелинейные эффекты, а именно изменение коэффициента преломления и самофокусировка в кристалле титана сапфира.

Благодаря самофокусировке (нелинейный эффект Керра), этот флуктуационный выброс испытывает меньшие потери во внутреннем резонаторе, так как он лучше сфокусирован. Таким образом он усиливается лучше остальных и благодаря большой интенсивности он уменьшает инверсию населенности. Менее интенсивные выбросы оказываются ниже порога усиления. Когда интенсивность импульса УКИ достигает такого значения, что большая часть инверсной населенности снимается за время прохождения этого импульса через усилитель, лазер выходит на стабильный моноимпульсный режим работы. То есть, в резонаторе в один момент времени может находиться только один импульс. Это соответствует частоте повторения импульсов около 100МГц.

6. Образцы.

Одним из возможных вариантов образцов, которые исследуют на нелинейно магнитооптические эффекты являются магнитные наностержни. Они получают путем электрохимического осаждения магнитного материала, допустим никеля, в поры алюминия. Используемая пленка алюминия выращивается на разделительном слое из золота и тантала, которые наносятся на кремниевую подложку. Слой

тантала используется для предотвращения отслаивания алюминия. Золото, в свою очередь, необходимо для лучшего размещения никеля в поры.

Поры в алюминии формируются при постоянном напряжении в электролитической ячейки, в которой анодом является алюминий, а в качестве катода используется платиновый электрод. В ходе экспериментов было обнаружено, что размер пор и их набивка линейно зависят от приложенного напряжения.

В первые секунды анодирования на алюминии образуется барьерный слой, который сильно способствует образованию пор, но при этом мешает дальнейшему размещению в них магнитных материалов. Для того, чтобы его впоследствии удалить барьерный слой подвергают непродолжительному травлению.

В итоге, такой образец представляет собой массив не упорядоченных в латеральном направлении никелевых стержней, которые выращиваются нормально к поверхности. Характерные размеры таких стержней варьируются в пределах порядка десятков нм. Стержни размещают на кремниевой подложке и отделены от нее буферным золото-танталовым слоем. А пространство между стержнями заполняется алюминием и оксидом алюминия. Образец не является однородным, что объясняется самим процессом роста описанной структуры. Магнитные же свойства образца характеризуются петлей гистерезиса.

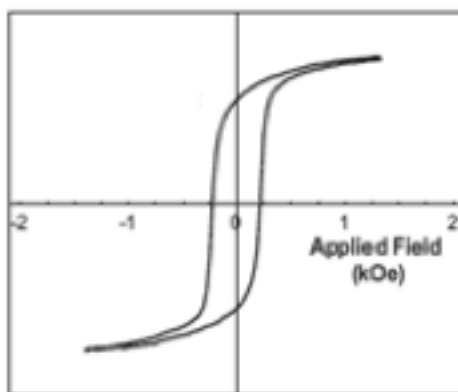


Рис. 3. Магнитный гистерезис образца, описанного выше.

7. Экспериментальная установка для наблюдения второй гармоники.

В эксперименте, в котором я принимала участие, использовалась следующая экспериментальная установка. Мы работали с установкой, в которой в качестве накачки используется линейно поляризованное излучение титан-сапфирового

лазера. Активной средой в этом типе лазера является короткий стержень из монокристалла сапфира с примесью ионов Ti^{3+} . Такая активная среда поглощает примерно 90% накачки. А широкая полоса усиления дает возможность осуществлять перестройку длины волны лазерной генерации.

Длительность импульсов титан-сапфирового лазера равна приблизительно 80 фс, которые следуют с частотой 80 МГц. Еще одной характеристикой лазера является его выделяемая мощность. В нашем случае средняя мощность импульсов была порядка 120 мВт при мощности накачки аргонового лазера 3 Вт. Такой лазер излучает в диапазоне 710–850 нм. А спектральная ширина линии на длине волны 800 нм составляет приблизительно 6 нм.

Излучение испускаемое накачкой поляризуется с помощью двойного компенсатора Бабинэ и призмы Глана. Далее поляризованное излучение накачки проходит через фильтр RG695 толщиной 3 мм. Он подавляет засветку от аргонового лазера при помощи короткофокусной линзы фокусирует на образец пятно диаметром порядка 50 мкм. После образца располагается фильтр BG39 толщиной 9 мм. Он, в свою очередь, отсекает излучение накачки и пропускает только излучение второй гармоники, которое с помощью линзы преобразовывается в параллельный пучок. Далее сигнал второй гармоники проходит через призму Глана, определяющую поляризацию регистрируемого излучения, после чего он попадает на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), работающий в режиме счета фотонов.

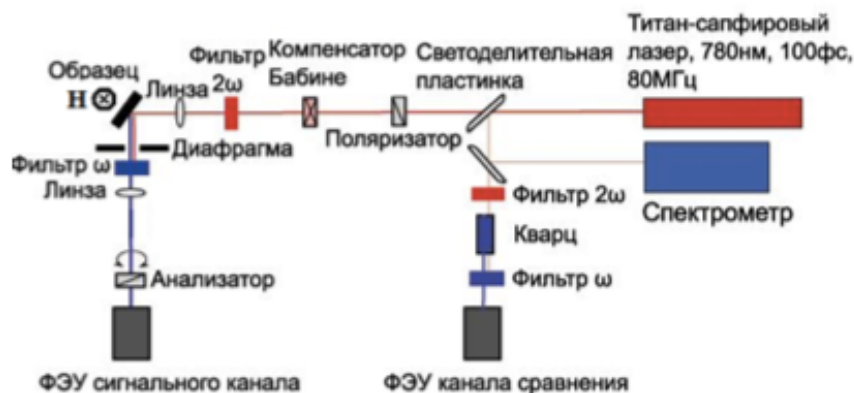


Рис. 4. Схема установки для регистрации второй гармоники.

Сигнал ФЭУ обрабатывается с помощью аналогоцифрового преобразователя и затем рассматривается компьютером. Длина волны накачки контролируется спектрометром. Часть излучения титан-сапфирового лазера отводится в канал сравнения. Источником генерации второй гармоники в канале сравнения является пластина кристаллического Z-кварца. Его квадратичная восприимчивость не имеет спектральных особенностей в области перестройки данного лазера.

В ходе эксперимента измеряется как раз отношение числа отсчетов ФЭУ сигнального канала к числу отсчетов ФЭУ канала сравнения. Это сильно уменьшает влияние флуктуации мощности и длительности импульсов лазерного излучения на величину регистрируемого сигнала.

8. Заключение

Целью данной курсовой работы было изучение нелинейно-оптических эффектов и способов их экспериментального исследования. В частности, я принимала участие в экспериментах, проводимых лабораторией нелинейной оптики наноструктур и фотонных кристаллов, по исследованию магнитоиндуцированных нелинейно-оптических эффектов.

Нелинейная оптика изучает явление генерации второй оптической гармоники. Оно заключается в том, что при прохождении мощного лазерного пучка большой интенсивности в кристалле может наблюдаться удвоенная частота света.

Присутствие намагниченности у образца влияет на оптические свойства среды. Отдельное место среди магнитоиндуцированных эффектов занимают магнитооптические эффекты Керра, которые проявляются при отражении света от поверхности намагниченного материала.

Для наблюдения различных нелинейно-оптических эффектов используются оптические квантовые генераторы или лазеры, которые способны генерировать свет с большой напряженностью электрического поля, сравнимой с напряженностью микроскопического поля в атомах.

В современных экспериментальных установках часто используются лазеры сверхкоротких импульсов. Примером такого лазера служит титан-сапфировый лазер, принцип работы которого я исследовала.