

К 50-летию создания лазера

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 50-летию создания лазера

Совместное заседание научной сессии
Отделения физических наук Российской академии наук
и учёных советов Физического института им. П.Н. Лебедева
и Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, 21 апреля 2010 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201101i.0093

21 апреля 2010 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялось совместное заседание научной сессии Отделения физических наук РАН и учёных советов Физического института им. П.Н. Лебедева и Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, посвящённое 50-летию создания лазера.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Алфёров Ж.И.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах.*

2. **Багаев С.Н.** (Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск). *Спектры сверхвысокого разрешения и их фундаментальное применение.*

3. **Масалов А.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Отделение оптики ФИАН: первые работы по созданию лазеров.*

4. **Гарнов С.В., Щербаков И.А.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Лазерные источники мегавольтных терагерцевых импульсов.*

5. **Сергеев А.М., Хазанов Е.А.** (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород). *Структурные функции развитой турбулентности.*

6. **Попов Ю.М.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Об истории создания полупроводниковых лазеров.*

7. **Маненков А.А.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Самофокусировка лазерных пучков: современное состояние и перспективы.*

Статьи, написанные на основе докладов 3, 4, 6 и 7, публикуются ниже. Расширенное содержание доклада 5, представленное в виде обзора, публикуется в этом номере УФН на с. 9.

PACS numbers: 01.65.+g, 42.55.-f, 42.60.-v
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201101j.0093

Отделение оптики ФИАН: первые работы по созданию лазеров

А.В. Масалов

1. Введение

После успехов в создании мазеров в середине 50-х годов прошлого века идея создания квантовых генераторов, излучающих в оптическом диапазоне, т.е. лазеров, витала в воздухе. Термин "лазер" тогда ещё не имел распространения. Многие хотели ответить на вызов природы, осуществить инверсию населённостей в среде и продемонстрировать усиление света в оптическом диапазоне длин волн. При этом естественное для исследователей желание быть первым всячески ускоряло проведение таких попыток. И сегодня "вирус первенства" является мощным рычагом познания природы. В представленном докладе обсуждаются пионерские работы по созданию лазеров, выполненные сотрудниками лабораторий оптического направления ФИАН. Хотя к этим работам применима характеристика "первые", в них ценно, в первую очередь, то влияние, которое они оказали на дальнейшее развитие физики лазеров и лазерной техники¹.

¹ "Вирусом первенства" заражены многие исследователи, примеры может указать каждый. Однако среди выдающихся учёных есть и такие, которых "вирус первенства" не затронул. Ярким примером служит личность Григория Самуиловича Ландсберга. В год открытия комбинационного рассеяния света, когда Г.С. Ландсберг и его ближайший коллега Леонид Исаакович Мандельштам анализировали опыты по рассеянию света в кварце, они хорошо понимали, что речь идёт о новом явлении фундаментального характера. И вместе с тем они были далеки от мысли "застолбить" результат, но были озабочены проверкой достоверности опытов и согласованностью физической картины явления. Этого не скажешь о Рамане, именем которого сегодня называют комбинационное рассеяние света. Другой пример личности, не заражённой "вирусом первенства", — Михаил Дмитриевич Галанин.

А.В. Масалов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ. E-mail: masalov@lebedev.ru

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА АКАДЕМИИ НАУК СССР

УТВЕРЖДАЮ.

Директор
Физического института АН СССР
академик

« 30 » декабря 1961 г.

Д. В. Скобельцын
(Д. В. Скобельцын)

О Т Ч Е Т

по теме "ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ,
УСИЛЕНИЯ И ИНДИКАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ".

Руководитель работы
доктор физ.мат.наук -

Н. Г. Басов
(Н. Г. Басов)

Ответственные исполнители:

Профессор П. А. Бакулин
Член-корр. АН СССР Б. М. Вул
Профессор В. Л. Лешин
Доктор технич. наук А. Б. Фрадков
Доктор физ.мат. наук М. Д. Галанин
Мл. научн. сотр. В. Н. Заварицкая
Мл. научн. сотр. О. Н. Крохин
Кандидат Ф. м. н. А. М. Леонтович
Кандидат Ф. м. н. В. И. Малышев
Кандидат Ф. м. н. Б. Д. Осипов
Кандидат Ф. м. н. Ю. М. Попов
Кандидат Ф. м. н. С. Г. Раутиан
Кандидат Ф. м. н. И. И. Собельман
Кандидат Ф. м. н. В. Ф. Тунницкая.

П. А. Бакулин
Б. М. Вул
В. Л. Лешин
А. Б. Фрадков
М. Д. Галанин
В. Н. Заварицкая
О. Н. Крохин
А. М. Леонтович
В. И. Малышев
Б. Д. Осипов
Ю. М. Попов
С. Г. Раутиан
И. И. Собельман
В. Ф. Тунницкая

Москва, 1961 г.

Титульная страница отчёта 1961 г.

В начале 1959 г. Николай Геннадиевич Басов организовал в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) работу по теме "Фотон", направление исследований которой сформулировано в её заглавии

"Применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения". Н.Г. Басов обеспечил государственную поддержку этих работ, которая выразилась в соответствующем Постановлении прави-

тельства в апреле 1960 г. В то время у Н.Г. Басова и его коллег уже имелись идеи по созданию полупроводниковых лазеров. Тема "Фотон" расширила круг поисков сред для оптических квантовых генераторов (ОКГ), включив в число таких сред люминесцентные кристаллы и газы. Для участия в работе были привлечены опытные сотрудники — "оптики", которых мы сегодня знаем как ярких исследователей и выдающихся учёных, внёсших существенный вклад в науку. На приведённой фотографии показана титульная страница отчёта, написанного в конце 1961 г., с перечнем ответственных исполнителей темы. Там мы находим и фамилии "оптиков": П.А. Бажулин, В.Л. Левшин, М.Д. Галанин, А.М. Леонтович, В.И. Малышев, С.Г. Раутиан, И.И. Собельман, В.Ф. Туницкая — это более половины списка.

Сотрудники лабораторий оптического направления ФИАНа выполнили ряд пионерских работ по созданию лазеров. В данной статье перечислены некоторые из этих приоритетных достижений, к которым применимы слова либо "первое в мире", либо "первое в СССР".

Именно в рамках темы "Фотон" была выполнена первая работа из перечня пионерских достижений, о которых далее пойдёт речь. Это создание первого в нашей стране рубинового лазера.

2. Лазер на рубине

Первая советская публикация о реализации рубинового лазера и свойствах его излучения принадлежит М.Д. Галанину и его коллегам А.М. Леонтовичу и З.А. Чижиковой [1]. Статья послана в печать 18 мая 1962 г. По словам исполнителей, собственно рубиновый лазер заработал в лаборатории в сентябре 1961 г. В то время рубиновый лазер уже был создан в США. Первая публикация [2] об усилении света, принадлежащая Мейману, вышла в *Nature* в 1960 г. В том же году Мейманом был реализован режим генерации [3]. По горячим следам рубиновый лазер был запущен Шавловым (также в США) [4]. Таким образом, о публикации работы М.Д. Галанина с коллегами можно говорить как о первой в СССР. Имеются неподтверждённые сведения о создании рубинового лазера в Государственном оптическом институте (ГОИ) Л.Д. Хазовым в середине 1961 г. К сожалению, документальных свидетельств об этом найти не удалось².

Создание советского рубинового лазера потребовало от "ростовиков" изготовления образцов рубина нестандартного качества. Часовая промышленность того времени употребляла кристаллы рубина с концентрацией хрома 2,5 %, и такие кристаллы были доступны, однако для осуществления генерации требовались образцы с пониженной концентрацией хрома и больших размеров. Такие кристаллы были выращены специально для проекта сотрудниками Особого конструкторского бюро (ОКБ-311) А.С. Бебчуком и Ю.Н. Соловьевой. Особой заботы требовало обеспечение оптической однородности кристаллов. Довольно удачно сложилась ситуация с лампами-вспышками для накачки рубиновых элементов. Такие лампы производились для бортовых самолётных маяков, используемых при ночных полётах. Зеркала первых лазеров были серебряными и напылялись прямо на полированные торцы рубинового стержня в вакуумной установке. Такие установки кустарного

изготовления имелись в ФИАНе, но требовали при работе с ними определённого искусства. Таким образом, ФИАНовский рубиновый лазер стал результатом достижений советской промышленности и опыта переводной науки.

По словам здравствующих ныне участников создания рубинового лазера — А.М. Леонтовича и З.А. Чижиковой — вскоре после запуска лазера на советских кристаллах к ним в руки попал американский образец лазерного рубина. На нём тоже была получена генерация.

Международная научная общественность была непосредственно ознакомлена с советскими достижениями по рубиновому лазеру на III Международной конференции по квантовой электронике в Париже в 1963 г. [5]. Текст доклада, опубликованный в трудах конференции, является примером глубины и полноты исследований, выполненных с излучением лазера (этот текст приведён в приложении I к статье А.М. Леонтовича и З.А. Чижиковой в данном номере (с. 82).

В истории создания рубинового лазера примечательно то, что рубин — кристалл корунда с хромом — ещё за несколько лет до успеха попал в поле зрения как американских, так и советских исследователей именно в качестве наиболее привлекательного кандидата для осуществления генерации. Об этом мы можем прочитать как в отчёте по теме "Фотон", так и в воспоминаниях Н.Г. Басова, опубликованных в книге [6]. Опыт и интуиция не подвели первопроходцев.

Значение запуска первого лазера в ФИАНе трудно переоценить. Множество знакомых и незнакомых людей приходили в лабораторию люминесценции посмотреть на "рубиновый ОКГ". Благодаря открытости авторов, лазер сразу был повторён во многих лабораториях, и исследования по лазерам, их совершенствованию и применению стремительно развернулись широким фронтом.

3. Фотодиссоционный лазер

Вторым примером пионерских работ по лазерам следует назвать выдвижение идеи и создание оптического квантового генератора с фотодиссоционным принципом получения инверсии. Предложение использовать фотодиссоционный механизм для осуществления лазерной генерации принадлежит С.Г. Раутиану и И.И. Собельману [7]. Предполагалось, что в процессе диссоциации молекул коротковолновым излучением один из продуктов распада окажется преимущественно в возбуждённом состоянии. Широкая линия молекулярного поглощения и узкая линия испускания атома в продуктах распада сулили большой коэффициент усиления, необходимый для лазерной генерации. Данная идея подробно изложена в упомянутом отчёте ФИАНа 1961 г. В последующих экспериментальных поисках сотрудники группы В.И. Малышева обратились к молекулам NaI и TI₃, которые в результате диссоциации довольно ярко светились; это были линии излучения натрия (жёлтая) и таллия (зелёная). Однако первая лазерная генерация на принципе фотодиссоциации была получена Каспером и Пиментелем (США) на молекулах CF₃I и CH₃I в конце 1964 г. [8]. Каспер и Пиментель "наткнулись" на высокую яркость излучения в экспериментах по анализу инфракрасных спектров испускания этих сред в процессе диссоциации ультрафиолетовым излучением — излучал атомарный йод на длине волны 1,315 мкм. "Подсказка" американцев позволила сотрудникам группы В.И. Ма-

² См. архивные материалы ГОИ, впервые публикуемые в этом номере *УФН*, с. 79. (Примеч. ред.)

лышева реализовать фотодиссоционный лазер в считанные месяцы. Это была первая работа в нашей стране по лазерам с фотодиссоционным механизмом накачки среды [9]. Данный эксперимент открыл направление исследований различных вариантов фотодиссоционных йодных лазеров в нашей стране, в том числе и со взрывной накачкой (см. статью В.С. Зуева [10]).

4. Ультракороткие лазерные импульсы

В качестве важного достижения в области создания лазеров следует отметить работы В.И. Малышева с сотрудниками, лежавшие у истоков создания лазеров, генерирующих импульсы ультракороткой длительности. Речь идёт о реализации и исследовании режима самосинхронизации лазерных мод.

Здесь следует напомнить, что с момента начала работы первого рубинового лазера стало очевидным, что импульсные твердотельные лазеры, как правило, генерируют нерегулярные последовательности "пиков" — пиков свободной генерации — на протяжении нескольких сотен пикосекунд. Тогда почти сразу был сформулирован принцип модулированной добротности, который после реализации позволил сконцентрировать энергию множества лазерных пиков в один мощный "гигантский импульс" длительностью в несколько наносекунд или десятков наносекунд. Лазеры с модулированной добротностью сулили повышение интенсивности излучения на несколько порядков, и разработка средств модуляции добротности пошла полным ходом. Первые модуляторы представляли собой электрооптические затворы, которые требовали многокиловольтного импульсного питания. Для модуляции добротности стали использовать также вращающуюся отражательную призму (частота вращения — несколько десятков килогерц). Н.Г. Басов предложил В.И. Малышеву разработать совместно с химиками модулятор добротности в виде раствора просветляющегося красителя. В.И. Малышев привлёк к работе сотрудников оптической лаборатории ФИАНа А.С. Маркина и В.С. Петрова. К 1966 г. такие затворы были созданы в оптической лаборатории ФИАНа в сотрудничестве с химиками Научно-исследовательского института химико-фотографической промышленности (НИИХИМФОТО) И.И. Левкоевым и А.Ф. Вомпе [11]. Затвор представлял собой компактную стеклянную кювету с раствором красителя, которая устанавливалась в лазерный резонатор и не требовала управления. Здесь исключительно уместным оказался опыт химиков по созданию сред, затемняющихся под действием мощного излучения (в первую очередь, от вспышки взрыва ядерной бомбы). В процессе изучения лазера с просветляющимся красителем был обнаружен режим самосинхронизации мод, т.е. режим, в котором "гигантский" импульс приобретал дополнительную структуру в виде цепочки импульсов с пикосекундной длительностью. Интенсивность излучения в максимуме пикосекундного импульса увеличивалась ещё на несколько порядков по сравнению с интенсивностью обычного "гигантского" импульса. О реализации режима самосинхронизации мод в 1966 г. впервые сообщили американские исследователи [12]. В.И. Малышев и А.С. Маркин были настолько близки к самостоятельному обнаружению этого режима, что сразу выполнили исследовательскую работу на эту тему [13] и послали её в печать в сентябре 1966 г. В работе принимала участие Татьяна Ивановна Кузнецова, которая обеспечила тео-

ретическую проработку вопроса и впоследствии выполнила немало теоретических исследований по ультракоротким световым импульсам. Таким образом, указанная работа оказалась первой в нашей стране публикацией по реализации режима самосинхронизации мод в лазере. Разработанный для этих целей краситель № 3955 (из ряда полиметиновых) для неодимового лазера, который из рук В.И. Малышева распространился по многим лабораториям, позволил выполнить немало ярких работ с импульсами пикосекундной длительности. Сегодня режим самосинхронизации лазерных мод после ряда новых совершенствований распространился на диапазон фемтосекундных длительностей и фемтосекундные лазеры применяются в самых разных областях науки и техники.

5. Лазер на парах меди

После первых успехов в создании лазеров Н.Г. Басов инициировал поиск новых лазерных сред, в частности, в газовой фазе. В оптической лаборатории ФИАНа к этим исследованиям подключился Г.Г. Петраш с сотрудниками. В поле зрения группы попал лазер на парах меди. Лазер на парах меди с весьма привлекательными энергетическими характеристиками излучения был создан Уолтером [14] (США) в 1967 г. Недостатком этого лазера являлась необходимость внешнего разогрева активной среды до температуры 1500 °С. В группе Г.Г. Петраша была предложена и реализована идея саморазогревного лазера. Для этого потребовалось разработать новую конструкцию разрядной трубки. Уже в первой публикации по саморазогревному лазеру на парах меди удалось достигнуть средней мощности 15 Вт (на двух линиях — жёлтой (510,5 нм) и зелёной (578 нм)) при частоте повторения импульсов 20 кГц; пиковая мощность достигала 200 кВт, к.п.д. от выпрямителя $\approx 1\%$ [15]. В результате энергетические характеристики лазера на парах меди выдвинули его в число "рабочих лошадей" лазерной техники. В процессе дальнейшего совершенствования лазера авторам удалось добиться почти дифракционной расходимости излучения за счёт использования неустойчивого резонатора [16]. Ими также был реализован усилитель яркости на основе саморазогревной трубки с парами меди [17] и создан лазерный проекционный микроскоп с усилителем яркости в качестве основного элемента [18]. Решающий вклад группы Г.Г. Петраша в разработку лазера на парах меди признан во всём мире.

6. Внутррезонаторная лазерная спектроскопия

В конце 1960-х годов в ФИАНе была выдвинута и реализована идея о внутррезонаторной лазерной спектроскопии. Идея о детектировании слабых спектральных линий поглощающих сред, помещаемых внутрь лазерного резонатора, принадлежит сотруднику лаборатории квантовой радиофизики Альберту Фёдоровичу Сучкову [19]. В основу предложения А.Ф. Сучкова легло то обстоятельство, что лазерное излучение "бежит" в резонаторе несколько тысяч (и более) раз, накапливая слабый эффект поглощения среды. Вскоре первый эксперимент, демонстрирующий высокую чувствительность к спектральным потерям, был выполнен по инициативе А.Ф. Сучкова (и с его участием) в группе Э.А. Свириденкова в лаборатории люминесценции ФИАНа [20]. Был использован неодимовый лазер и дифракционный спектрограф по схеме В.И. Малышева. Авторы применили

весь свой опыт для устранения паразитных спектрально-селективных потерь в лазере, для того чтобы зарегистрировать только контролируемые потери. Этот результат воодушевил участников, они разработали метод высокочувствительной спектроскопии, который получил название внутривибрационной лазерной спектроскопии (ВРЛС). Сегодня известны многочисленные примеры использования метода ВРЛС с другими широкополосными лазерами для детектирования линий самых разнообразных веществ. Приоритет группы Э.А. Свириденкова в разработке и распространении метода признан в мире. В 1980-х годах цикл работ по ВРЛС номинировался на Государственную премию СССР, но из-за особенностей личных взаимоотношений за пределами авторского коллектива данная работа премию не получила.

7. Механизм работы CO₂-лазера

Электроразрядный CO₂-лазер с момента создания в 1966 г. привлек внимание исследователей новизной спектрального диапазона (10,6 мкм) и необычностью механизма создания инверсии: это был лазер на переходах между *колебательными* уровнями молекулы. Оптимизация CO₂-лазера наталкивалась на трудности из-за отсутствия понимания механизма создания инверсии на колебательных уровнях в газовом разряде. Ситуация проявилась с появлением статьи Н.Н. Соболева и В.В. Соковикова [21] и последовавшей за ней статьи [22]. Авторы сопоставили данные о средней энергии электронов в разряде с зависимостью сечения возбуждения соответствующих колебательных уровней молекул и увидели, что механизм электронного удара весьма эффективен. При этом инверсия между колебательными уровнями обеспечивается столкновениями с атомами и молекулами. После появления этих статей началась целенаправленная работа по теоретическому описанию CO₂-лазера, и эксперименты по его совершенствованию получили новый импульс. В частности в русле этих работ был осуществлён пуск первого в СССР газодинамического CO₂-лазера [23].

8. Заключение

Подводя итог представленному материалу, можно заключить, чем был обусловлен успех советской науки в создании лазеров.

- В СССР существовала среда высококвалифицированных учёных, которая постоянно подпитывалась исследовательскими кадрами из вузов (Московский физико-технический институт (МФТИ), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Московский инженерно-физический институт и др.). Только из МФТИ, созданного для подготовки физиков-исследователей, за послевоенные годы в ФИАН пришло несколько сотен выпускников. Лидеры лазерной программы Н.Г. Басов и А.М. Прохоров смогли опереться на школы, созданные в ФИАНе С.И. Вавиловым, Г.С. Ландсбергом, Л.И. Мандельштамом.

- В СССР функционировала система финансирования научных исследований. Правительство реагировало на нужды науки и стимулировало научный прогресс. Для развития лазерных исследований были введены в строй новые мощности: корпуса на территории ФИАНа, подразделения ФИАНа в г. Троицке с жильём для учёных, Институт спектроскопии, Научно-исследовательский институт "Полнос" и другие лазерные научно-исследовательские институты.

- Промышленность СССР была в состоянии обеспечить научные исследования элементной базой и приборами; в СССР существовали производства для создания крупных исследовательских установок, имелись технологии для создания уникальных материалов.

При известных недостатках системы власти тех времён в стране осуществлялась стратегически взвешенная программа научного и технического развития. Лазерные исследования были частью этой программы.

Список литературы

1. Галанин М Д, Леонтович А М, Чижикова З А *ЖЭТФ* **43** 347 (1962) [Galanin M D, Leontovich A M, Chizhikova Z A *Sov. Phys. JETP* **16** 249 (1963)]
2. Maiman T H *Nature* **187** 493 (1960)
3. Maiman T H et al. *Phys. Rev.* **123** 1151 (1961)
4. Collins R J et al. *Phys. Rev. Lett.* **5** 303 (1960)
5. Chizhikova Z A et al., in *Quantum Electronics: Proc. of the Third Intern. Congress, Paris, 1963* (Eds P Grivet, N Bloembergen) (New York: Columbia Univ. Press, 1964) p. 1483
6. Басов Н Г *О квантовой электронике* (М.: Наука, 1987)
7. Раутиан С Г, Собельман И И *ЖЭТФ* **41** 2018 (1961) [Rautian S G, Sobel'man I I *Sov. Phys. JETP* **14** 1433 (1962)]
8. Kasper J V V, Pimentel G C *Appl. Phys. Lett.* **5** 231 (1964)
9. Андреева Т Л и др. *ЖЭТФ* **49** 1408 (1965) [Andreeva T L et al. *Sov. Phys. JETP* **22** 969 (1966)]
10. Зуев В С *История науки и техники* (4) 69 (2009)
11. Мальшев В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **1** (6) 11 (1965) [Malyshev V I et al. *JETP Lett.* **1** 159 (1965)]
12. DeMaria A J, Stetser D A, Heynau H *Appl. Phys. Lett.* **8** 174 (1966)
13. Кузнецова Т И, Мальшев В И, Маркин А С *ЖЭТФ* **52** 438 (1967) [Kuznetsova T I, Malyshev V I, Markin A S *Sov. Phys. JETP* **25** 286 (1967)]
14. Walter W T *Bull. Am. Phys. Soc.* **12** 90 (1967)
15. Исаев А А, Казарян М А, Петраш Г Г *Письма в ЖЭТФ* **16** 40 (1972) [Isaev A A, Kazaryan M A, Petrash G G *JETP Lett.* **16** 27 (1972)]
16. Земсков К И и др. *Квантовая электроника* **1** 863 (1974) [Zemskov K I et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 474 (1974)]
17. Земсков К И, Казарян М А, Петраш Г Г, в сб. *Оптические системы с усилителями яркости* (Труды ФИАН, Т. 206, Отв. ред. Г Г Петраш) (М.: Наука, 1991)
18. Земсков К И и др. *Квантовая электроника* **1** 14 (1974) [Zemskov K I et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 5 (1974)]
19. Сучков А Ф, Препринт № 126 (М.: ФИАН, 1970)
20. Пахомычева Л А и др. *Письма в ЖЭТФ* **12** 60 (1970) [Pakhomycheva L A et al. *JETP Lett.* **12** 43 (1970)]
21. Соболев Н Н, Соковиков В В *Письма в ЖЭТФ* **4** 303 (1966) [Sobolev N N, Sokovikov V V *JETP Lett.* **4** 204 (1966)]
22. Соболев Н Н, Соковиков В В *Письма в ЖЭТФ* **5** 122 (1967) [Sobolev N N, Sokovikov V V *JETP Lett.* **5** 99 (1967)]
23. Дронов А П и др. *Письма в ЖЭТФ* **11** 516 (1970) [Dronov A P et al. *JETP Lett.* **11** 353 (1970)]

PACS numbers: **42.50.** – **p**, **42.65.** – **k**, 42.72.Ai
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201101k.0097

Лазерные методы генерации мегавольтных терагерцевых импульсов

С.В. Гарнов, И.А. Щербаков

1. Введение

Создание источников терагерцевого (ТГц) электромагнитного излучения связано с активно развивающимися в последнее десятилетие новыми методами и направлениями фундаментальных исследований в физике, химии,

С.В. Гарнов, И.А. Щербаков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ
E-mail: garnov@kapella.gpi.ru