

**М. И. Дзюбенко, Ю. В. Корниенко**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [milv@ire.kharkov.ua](mailto:milv@ire.kharkov.ua)

## 50 ЛЕТ ЛАЗЕРАМ В ИНСТИТУТЕ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ ИМ. А. Я. УСИКОВА НАН УКРАИНЫ

Описываются история запуска первого лазера в ИРЭ АН УССР, подготовка эксперимента по локации Луны, создание и развитие лазеров на красителях. Библиогр.: 23 назв.

50 лет назад был запущен первый лазер в Харькове. Это произошло 14 октября 1962 г. в лаборатории поглощения радиоволн, руководимой академиком АН УССР А. Я. Усиковым. Участниками этого события были молодые сотрудники Усикова Н. Г. Старунов, Ю. А. Нестриженко и Ю. В. Корниенко. Лазер был сделан из подручных материалов на кристалле розового рубина длиной 75 мм, полученном из Института кристаллографии в Москве. Накачка производилась двумя лампами ИФК-2000. Резонатор был образован серебряными покрытиями на торцах кристалла. Первые эксперименты с этим лазером состояли в фокусировке лазерного луча на удаленных объектах с помощью телескопической системы (трубка АТ-1). Эти эксперименты навели на мысль о светолокации удаленных объектов с применением лазера. Вскоре был получен стержень из неодимового стекла, на котором был сделан первый в ИРЭ лазер на 1,06 мкм. При работе с ним был применен оригинальный способ визуализации инфракрасного изображения на люминесцирующем экране. Еще через два месяца был запущен первый в ИРЭ лазер на рубине с модуляцией добротности резонатора, позволивший получить короткие импульсы света мощностью в десятки мегаватт. Обладание этой новой техникой поставило на повестку дня вопрос о ее эффективном применении для решения каких-то значительных научных или технических задач. Рассмотрение этого вопроса на семинарах отдела, руководимых Усиковым, постепенно привело к мысли о светолокации Луны с целью уточнения параметров ее орбиты. Основная трудность, которую надо было преодолеть, состояла в том, что ожидаемая величина сигнала, отраженного от Луны, была очень мала: в среднем намного меньше одного фотона за одну посылку. Оставалось рассчитывать на накопление сигнала. Эта задача существенно усложнялась тем, что за время между посылками измеряемое расстояние значительно изменялось. В то время в литературе нельзя было найти сведений, которые могли бы послужить базой для теории оптимального накопления сигнала в режиме счета фотонов [1]. Эту базу пришлось создавать самим.

Еще больше проблем было у экспериментаторов. Перечислим только вопросы, над которыми им пришлось работать. Как максимально сузить диаграмму направленности лазера? С помощью селектора мод? (Но он снижает энергию лазера, внося в резонатор дополнительные потери.) Как найти оптимальный компромисс? (Ответ в [2]). Как обеспечить наилучшее охлаждение кристалла и максимальную частоту посылок? Как юстировать лазер на телескопе в условиях переменных механических нагрузок? Какова живучесть кристалла при генерации максимальных энергий и мощностей? По каким параметрам выбирать кристаллы для задающего генератора и усилителя мощности? Каков оптимальный режим накачки кристалла? Каков оптимальный режим работы ламп накачки? Как максимально сузить полосу длин волн, воспринимаемую приемником излучения? По каким параметрам выбирать фотоумножитель? Как снизить собственный шум фотоумножителя? (Можно охлаждением, но оно снижает квантовый выход фотокатода. Как найти компромисс?) Как сконструировать холодильник для фотоумножителя? Как предотвратить запотевание стекла охлажденного фотоумножителя? По какому параметру выбирать фотоумножитель? Какой фотоумножитель лучше? Можно ли как-то отличить шумовые импульсы фотоумножителя от сигнальных? Если да, как это сделать практически? Как найти компромиссный способ накопления сигнала с учетом того, что рекомендуемый теорией оптимальный способ при доступной тогда вычислительной технике слишком сложен? Какой район на Луне выбрать для локации? (Минимальная глубина, максимальное альbedo, максимальный оппозиционный эффект и т. д.)

Вот далеко не полный список наиболее актуальных вопросов, которые стояли перед экспериментаторами (и теоретиками тоже) и требовали своевременного решения [3]. На все это давалось два года.

Но особенно остро стоял вопрос о центральном элементе системы – лазере с нужными параметрами. Если вначале по светолокации Луны был лазер и требовалось на голом месте создать все остальное, то в конце уже было все, кроме лазера. Непрерывное уточнение первоначальных

расчетов давало все возрастающие требования к энергии лазера – от 1 Дж в начале работы до 10 Дж после уточнения. Лазер на 1 Дж был в самом начале, на 3 Дж появился через год упорной работы, но по мере приближения к рубежу 10 Дж трудности существенно возрастали. В конце концов требуемая энергия была достигнута, однако в этом режиме кристалл выдерживал очень небольшое количество вспышек. Повторные вспышки давали все меньшую энергию: под действием излучения происходило разрушение торца кристалла. Ресурс кристалла исчерпался за десяток вспышек. Но в случае светолокации Луны для получения результата требовалось порядка 10 000 вспышек.

Экстраполируя результаты измерений назад, мы нашли, что пиковая мощность лазера в первой вспышке составляла 160 МВт, т. е. четверть мощности первой очереди Днепрогэса. В литературе о таком лазере тогда не было никаких сообщений, а позже появились о том, как трудно его сделать. Авторы статьи [4] об этом лазере международный оргкомитет пригласил на XIII сессию КОСПАРа (1970 г.).

Исследование лазера с модулированной добротностью и с каскадами усилителей привели к разработке многоступенчатого лазера с несколькими рубиновыми стержнями с механической модуляцией добротности и прерыванием связи между каскадами усилителя. Это позволило достичь энергии генерации, ограниченной только прочностью активного материала – рубина [5].

Определенные трудности при локации Луны рубиновым лазером вынуждали обратиться к неодимовому стеклу, вторая гармоника излучения которого 0,53 мкм лежит в области максимальной чувствительности ФЭУ. Первые испытания стекла дали энергию больше ожидаемых 10 Дж. Его излучение, как правило, не поляризовано, что делает процесс преобразования малоэффективным. Использование оптимальных систем накачки позволило поляризовать излучение неодима и красителей оригинальными поляризаторами с минимальной (менее 0,1 %) анизотропией практически без потерь энергии, вопреки распространенным сведениям в научных публикациях. Эти поляризаторы позволили получить узкие (до 0,0001 нм) перестраиваемые линии генерации, плавно изменять степень поляризации, а при 2-импульсной генерации – управлять поляризацией отдельных импульсов и интервалом между ними (что важно при распознавании характера лоцируемой поверхности), плавно изменять спектральный интервал между двумя линиями генерации (это важно при преобразовании света в радиочастоты, что было бы актуальным для основной тематики ИРЭ) и дали возможность управлять шириной линии и спектром генерации неполяризованного излучения с помощью перестраиваемого интерференционно-поляризационного фильтра (что на первый взгляд

представляется парадоксальным). Результаты этих исследований докладывались на международных, всесоюзных и республиканских симпозиумах, конференциях, опубликованы более чем в 60 статьях и сообщениях и 6 авторских свидетельствах на изобретения [6, 7].

Разнообразные задачи требовали поиска новых веществ для лазера, внимание сотрудников отдела Усикова остановилось на растворах различных органических красителей. Было синтезировано и исследовано более 50 веществ с различными длинной полиметиновой цепи и заместителями в концевых группах. Изучено влияние растворителя, добротности резонатора и длины активной среды на спектральные и энергетические характеристики их излучения. Среди этих соединений найдены красители, обеспечивающие при накачке рубиновым лазером эффективность генерации, достигающую 30 %, и которые могут быть использованы как пассивные затворы. Синтезированные соединения позволили полностью перекрыть мощным лазерным излучением спектральный диапазон 720÷1 000 нм [8].

Для непрерывного перекрытия мощным лазерным излучением видимого диапазона требовались соединения, имеющие в этом участке спектра полосы флуоресценции и обладающие высокой квантовой эффективностью. С этой целью совместно с сотрудниками кафедры органической химии Харьковского государственного университета были синтезированы и изучены новые фотостойкие активные среды на основе производных кумарина [9], работающие как при лазерной, так и ламповой накачке. Новые активные среды для лазеров с ламповой накачкой на основе ацетоксипроизводных кумарина позволили существенно увеличить энергию генерации в синей области спектра. Изучено влияние структурных изменений в молекулах красителей на их спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики. Предложен, синтезирован и исследован ряд красителей нового класса – 2-иминобензопираны [10] для спектрального диапазона 520÷720 нм. Некоторые соединения этого класса по энергии и эффективности генерации не уступают лучшему красителю родамину 6Ж. Для улучшения пространственно-угловых и спектральных характеристик генерации лазеров на красителях с дисперсионными резонаторами создан и исследован ряд новых водорастворимых красителей для синие-зеленой области спектра [11].

Для возбуждения красителей немонахроматическим излучением в ИРЭ была предложена система накачки на основе промышленных импульсных ламп с предварительной ионизацией. Применение 2-импульсного режима позволило впервые получить генерацию в красном, желтом, зеленом и синем участках спектра с энергией излучения, более чем на порядок превышающей опубликованные ранее результаты [12].

С целью создания эффективных лазеров с заданными характеристиками проведены широкомасштабные исследования физических процессов, происходящих в импульсных ксеноновых коаксиальных и трубчатых лампах при мощных разрядах микросекундной длительности. Изучены электрические и спектрально-энергетические характеристики ламп в условиях нестационарных разрядов короткой длительности и установлены их закономерности [13]. Эти закономерности положены в основу новых методов расчета ламповых систем накачки. Новые методы были успешно применены при разработке серии оригинальных ламп. На базе этих ламп в ИРЭ были созданы эффективные системы накачки лазеров на красителях, обеспечивающих заданные спектрально-энергетические и временные характеристики излучения. Применение этих систем накачки позволило создать эффективные импульсные [13, 14] и импульсно-периодические лазеры на красителях серии «Промінь», обеспечивающие среднюю мощность излучения до 10 Вт при частоте следования 10 Гц и полном КПД  $\sim 1,0\%$ , плавно перестраиваемые в диапазоне 430÷720 нм при ширине линии  $\leq 0,1$  нм и имеющие угловую расходимость менее 5 мрад [15, 16].

Проведены комплексные исследования физических процессов, которые определяют угловую расходимость излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой с целью улучшения их диаграммы направленности [17]. Изучено одновременное влияние тепловых аберраций различных порядков и волноводных лучей на пространственно-угловые характеристики излучения этих лазеров. Показано, что высокую направленность излучения лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме, можно обеспечить лишь путем одновременного выполнения нескольких условий, таких как стабилизация температуры активного элемента и охлаждающей жидкости, выбор оптимальной концентрации красителя, использование углового селектора. Проведенные исследования позволили создать импульсные и импульсно-периодические лазеры на красителях с высокой спектральной и угловой яркостью излучения [15, 17, 18].

Исследованы различные способы управления частотой излучения лазеров данного типа с неселективными резонаторами и резонаторами с частотной селекцией. Изучены энергетические, спектральные, временные и пространственно-угловые характеристики излучения лазеров на красителях с дисперсионными резонаторами. Обнаружен ряд особенностей генерации перестраиваемых жидкостных лазеров, которые существенно сказываются на спектральном диапазоне перестройки и характеристиках выходного излучения. С целью расширения диапазона генерируемых частот, увеличения энергии и КПД гене-

рации жидкостных лазеров применены многокомпонентные растворы красителей. Изучены их энергетические и спектральные характеристики в широкополосных и дисперсионных резонаторах, найдены эффективные донорно-акцепторные пары для генерации в видимом диапазоне спектра [19]. Определены типы спектральных селекторов, которые обеспечивают требуемые параметры излучения и имеют высокую лучевую стойкость. Полученные результаты позволили обеспечить непрерывную перестройку длины волны излучения в диапазоне 430÷720 нм со спектральной шириной линии  $0,1\div 0,01$  нм [15].

Исследованы спектрально-энергетические и пространственно-угловые характеристики излучения многокаскадных лазеров различного типа. Это позволило создать лазеры на красителях, генерирующие во всем видимом диапазоне узкополосное излучение с энергией в импульсе несколько джоулей при ширине линии 0,001 нм [20].

С целью перекрытия ультрафиолетового диапазона спектра мощным лазерным излучением были изучены физические процессы, определяющие генерацию второй гармоники в кристаллах *KDP*-излучения перестраиваемых импульсно-периодических лазеров на красителях с ламповой накачкой [21]. Исследовано влияние спектральной ширины и расходимости лазерного излучения на эффективность преобразования частоты и найдены оптимальные условия генерации второй гармоники. Определены требования к оптическим элементам и параметрам излучения лазеров при микросекундных длительностях импульсов. Созданы мощные импульсно-периодические источники когерентного излучения с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 260÷360 нм.

В ходе выполнения исследований, направленных на создание мощных перестраиваемых лазеров на красителях непрерывного режима, были разработаны и созданы газоразрядные аргоновые лазеры с секционированной разрядной трубкой [22]. Изучено влияние параметров разряда, давления рабочего газа и внешнего магнитного поля на выходные характеристики излучения. Определены оптимальные условия разряда, при которых лазер обеспечивал мощность излучения порядка нескольких десятков ватт. Применение этих систем для возбуждения спиртовых растворов красителей, в частности, родамина 6Ж, позволило получить эффективную непрерывную генерацию, плавно перестраиваемую в широком диапазоне [22].

Проведены обширные исследования твердотельных лазеров на красителях, в качестве матрицы которых использован полиуретан и его производные [23]. Этот материал до настоящего времени практически не использовался для подобных целей. В процессе выполнения работ в Институте разработана методика изготовления

активных образцов на основе полиуретановых систем, активированных красителями родаминового и оксазинового рядов, созданы и изучены их спектрально-люминесцентные свойства. Исследованы основные генерационные характеристики полученных матриц в условиях поперечной накачки лазерным излучением микросекундной длительности. Показано, что созданные твердотельные активные среды при монохроматическом возбуждении обеспечивают плавно перестраиваемую генерацию в спектральном диапазоне 585–740 нм. На их основе могут быть созданы эффективные, компактные лазеры с перестраиваемой длиной волны излучения.

#### Библиографический список

1. Корниенко Ю. В. Оптимальный прием сигнала при светолокации астрономического объекта / Ю. В. Корниенко // Успехи современной радиоэлектрон. (Зарубеж. электрон.). – 2004. – № 1. – С. 39–45.
2. Корниенко Ю. В. О диаграмме направленности оптического квантового генератора на рабочем веществе со случайными неоднородностями показателя преломления / Ю. В. Корниенко // Укр. физ. журн. – 1968. – 13, № 3. – С. 500–506.
3. Светолокация... / А. Я. Усиков, А. А. Акимов, А. А. Бабищев, Л. А. Бугаенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, спец. вып. – С. 10–41.
4. Дзюбенко М. І. Дослідження ОКГ, призначеного для світлолокації Місяця / М. І. Дзюбенко, Ю. А. Нестриженко, В. Г. Парусимов // Укр. фіз. журн. – 1968. – 13, № 8. – С. 1233–1240.
5. Старунов М. Г. Лазер с максимальной глубиной модулирования добротности / М. Г. Старунов, В. Д. Еремка, В. Й. Бончковский // Укр. фіз. журн. – 1966. – 11, вип. 2. – С. 126–127.
6. Дзюбенко М. І. Лазеры для радиофизических исследований // Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / М. И. Дзюбенко, Ю. В. Корниенко, А. Я. Усиков. – К.: Наук. думка, 1986. – Гл. 6. – С. 344–347, 362.
7. Нестриженко Ю. А. Лазеры з керуваною поляризацією та спектром / Ю. А. Нестриженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, спец. вып. – С. 112–120.
8. Перетворення частоти рубінового лазера поліметиновими барвниками / М. І. Дзюбенко, І. Г. Науменко, І. Н. Чернюк, Г. Т. Пиллюгін // Укр. фіз. журн. – 1969. – 13, № 5. – С. 735–741.
9. Исследование некоторых спектральных и энергетических характеристик генерации ряда производных кумарина / М. И. Дзюбенко, Г. В. Водотока, В. В. Маслов, В. М. Никитченко // Оптика и спектроскопия. – 1975. – 39, № 3. – С. 554–557.
10. Эффективная генерация в зеленой области на растворах красителей нового класса / М. И. Дзюбенко, В. В. Маслов, И. Г. Науменко, В. П. Пелипенко // Оптика и спектроскопия. – 1980. – 49, № 4. – С. 764–767.
11. Дзюбенко М. І. Исследование лазерных характеристик водорастворимых красителей для сине-зеленой области спектра генерации / М. И. Дзюбенко, И. П. Крайнов, В. В. Маслов // Оптика и спектроскопия. – 1984. – 57, № 1. – С. 95–98.
12. Дзюбенко М. І. Оптическая генерация растворов органических красителей, возбуждаемых импульсными лампами / М. И. Дзюбенко, А. М. Коробов, И. Г. Науменко // Укр. физ. журн. – 1969. – 14, № 4. – С. 676–677.
13. Пелипенко В. П. Исследование источников немонохроматической накачки мощных лазеров на растворах органических красителей / В. П. Пелипенко, М. И. Дзюбенко, В. В. Шевченко // Квантовая электрон. – К.: Наук. думка. – 1989. – Вып. 37. – С. 22–31.
14. Лазер видимого диапазона на красителях с высоким КПД / М. И. Дзюбенко, И. Г. Науменко, В. П. Пелипенко, С. Е. Солдатенко // Письма в журн. эксперим. и теорет. физики. – 1973. – 18, № 1. – С. 43–46.
15. Установка серии «ПРОМІНЬ - 2», на основе мощных импульсно-периодических лазеров на красителях с ламповой накачкой / М. И. Дзюбенко, В. В. Маслов, В. П. Пелипенко, В. В. Шевченко // Тр. 3 конф. Лазерная физика и спектроскопия. – Гродно, 1997. – С. 156–158.
16. Импульсно-периодические лазеры на красителях с ламповой накачкой / М. И. Дзюбенко, В. В. Маслов, В. П. Пелипенко, В. В. Шевченко // Квантовая электрон. – 1995. – 22, № 5. – С. 436–438.
17. Исследование пространственно-угловых характеристик лазеров на растворах органических соединений / И. Г. Науменко, В. П. Пелипенко, М. И. Дзюбенко, В. В. Шевченко // Квантовая электрон. – К.: Наук. думка. – 1992. – Вып. 43. – С. 3–24.
18. Study of the spatial-angular distribution of flashlamp-pumped dye laser emission in various solvents / M. I. Dzyubenko, V. V. Maslov, V. P. Pelipenko, V. V. Shevchenko // Functional Materials. – 1996. – 3, N 4. – P. 529–523.
19. Дзюбенко М. І. О повышении эффективности генерации лазеров на растворах органических красителей / М. И. Дзюбенко, А. Я. Матвеев, И. Г. Науменко // Оптика и спектроскопия. – 1974. – 37, № 4. – С. 595–602.
20. Дзюбенко М. І. Многокаскадный лазер на красителе с ламповой накачкой / М. И. Дзюбенко, И. Г. Науменко, В. П. Пелипенко // Квантовая электрон. – 1987. – Вып. 32. – С. 13–25.
21. Research of the Features of the Second Harmonic Generation by Pulse-Periodic Flashlamp-Pumped Dye Laser / M. I. Dzyubenko, S. N. Kolpakov, V. P. Pelipenko, V. V. Shevchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2002. – 57, N 10&11. – P. 148–155.
22. Дальченко П. Г. Аргонный лазер с секционированной разрядной трубкой / П. Г. Дальченко, М. И. Дзюбенко, В. В. Шевченко // Квантовая электрон. – 1984. – Вып. 27. – С. 47–50.
23. Николаев С. В. Исследование особенностей генерации твердотельных лазеров на красителях при поперечном способе возбуждения / С. В. Николаев, В. В. Пожар, М. И. Дзюбенко // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 2. – С. 55–62.

Рукопись поступила 22.11.2012 г.

М. І. Дзюбенко, Ю. В. Корнієнко

50 РОКІВ ЛАЗЕРАМ В ІНСТИТУТІ  
РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ  
ІМ. О. Я. УСИКОВА НАН УКРАЇНИ

Описано історію запуску першого лазера в ІРЕ АН УССР, підготовка експерименту з локації Місяця, створення та розвиток лазерів на барвниках.

M. I. Dzyubenko, Yu. V. Kornienko

50 YEARS OF LASERS IN THE O. YA. USIKOV  
INSTITUTE FOR RADIOPHYSICS AND  
ELECTRONICS OF THE NATIONAL ACADEMY  
OF SCIENCES OF UKRAINE

Description of the first laser launch in the IRE NASU, preparation for the Moon location experiment, creation and development of dye lasers.