

достоинство такого лазера состоит в том, что диодная накачка осуществляется в полную апертуру волокна (500 мкм), а генерация — лишь в центральной его части порядка 40 мкм.

КПД генерации с диодной накачкой в волноводном режиме достигает 25 % при существенном увеличении яркости и качества излучения. Такая активная среда является кристаллическим аналогом лазера на основе кварцевого волокна с двойной оболочкой. Однако в последнем для реализации эффективной генерации требуется активная среда длиной 30–100 м, что обусловлено малой концентрацией активных частиц и, как следствие малым поглощением возбуждающего излучения.

В заключение хочу сделать вывод, не касающийся изложенных результатов. Не автору данного сообщения о них судить. Этот вывод таков. Следуя стратегии развития и соблюдая традиции, заложенные великими учителями, создателями квантовой электроники, и в настоящее, далеко не лучшее для отечественной науки время нашим научно-исследовательским коллективам удается выполнять работы мирового уровня, в том числе и экспериментальные. Низжайший поклон за это как ушедшим от нас, так и всем ныне здравствующим.

PACS numbers: 01.65.+g, 42.55.-f, 42.62.-b

От квантовой электроники — к лазерной технике (первые шаги применения)

А.Л. Микаэлян

1. Введение. "Долазерный период" (50-е годы)

Процесс развития общества сопровождается постоянным увеличением объемов информации, с которыми мы сталкиваемся в различных областях нашей деятельности. Непрерывно растут требования к скорости обработки информации и темпу ее передачи. Появилась необходимость оперировать большими массивами информации при высокой степени параллелизма вычислений и т.п.

История развития показывает, что решение указанных проблем передачи, обработки и хранения информации наиболее успешно достигается путем освоения новых, более коротковолновых диапазонов электромагнитных волн.

40-е годы ознаменовались началом освоения микроволнового диапазона волн (дециметровые и сантиметровые волны). Это привело к созданию волноводной и полупроводниковой техники, а также к многочисленным ее применениям в системах связи и радиолокации, в вычислительной технике и системах обработки и хранения информации.

Характерная особенность развития СВЧ-техники заключалась в широком использовании методов классической оптики. Так, например, были предложены и созданы многозеркальные антенны, получившие широкое применение (А.А. Пистолькорс, Л.Д. Бахрах), линзовые СВЧ-антенны с переменным показателем преломления из искусственного диэлектрика (W. Коск, А.Л. Микаэлян), геодезические СВЧ-линзы (А.А. Пистолькорс, Я.Н. Фельд, Л.Е. Зелкин) и др. Особенно важным для радиолокационных и радиорелейных систем связи стало

создание "невзаимных" волноводно-ферритовых элементов (в том числе вентиля на "пределном волноводе"), использующих хорошо изученные в оптике магнитооптические явления в ферромагнитных средах. Разработка этих устройств (предложенных автором в 1951 г.) проводилась по инициативе А.А. Пистолькорса и была доведена до стадии их широкого внедрения в нашей стране.

Несмотря на бурное развитие СВЧ-техники, уже в начале следующего десятилетия (т.е. в 50-е годы) были предприняты попытки продвинуться в еще более коротковолновые (миллиметровый и субмиллиметровый) диапазоны волн, где целый ряд практических реализаций выглядел более изящно (например, остронаправленные диаграммы излучения при небольших размерах антенн, широкополосность каналов связи и др.). Однако СВЧ-техника по многим причинам не получила заметного развития в этих диапазонах волн (трудности создания волноводов с малыми потерями, большие шумы в приемниках, ухудшение условий распространения волн в атмосферном слое и др.).

Одновременно с этим процессом все более четко начали вырисовываться контуры становления и развития квантовой электроники — нового научного направления, связанного с использованием явления индуцированного излучения (открытого Эйнштейном в 1917 г.) для создания когерентных источников излучения в оптическом диапазоне волн. Фундаментальные исследования в области квантовой электроники наиболее интенсивно проводились в нашей стране и в США.

Характерной особенностью исследований, проводимых у нас под руководством А.М. Прохорова и Н.Г. Басова, была практическая направленность на конечную цель — создание когерентного оптического генератора, что позволило бы начать освоение оптического диапазона волн для широкой гаммы разнообразных применений. Уже в 1955 г. появилась статья Басова, Прохорова по трехуровневой накачке, в 1958 г. был сформулирован принцип использования резонатора (Прохоров), после чего стало ясно, что на базе накопленных результатов исследований по спектроскопии кристаллов и газов (ФИАН, ИКАН, ГОИ и др.) можно приступить непосредственно к созданию лазера. В 1959 г. результаты фундаментальных исследований Басова и Прохорова были отмечены Ленинской премией, а в 1960 г. появился первый лазер на рубине.

2. Создание лазера — начало освоения оптического диапазона

Таким образом, 60-е годы можно считать началом освоения оптического диапазона волн, т.е. началом развития лазерной техники. Важность этого события была по достоинству отмечена в 1964 г. присуждением Нобелевской премии по физике Н.Г. Басову, А.М. Прохорову (СССР) и Ч. Таунсу (США).

Надо отметить, что большинство специалистов в области радиолокации и связи не придавали должного значения возможностям использования оптического диапазона волн ввиду ряда причин (большие потери при распространении волн в атмосфере, отсутствие оптических волноводов для передачи информации, низкая эффективность лазеров, шумовые ограничения при приеме и др.). В связи с этим Министерство радиопромышленности поручило институту, в котором я работал,

провести анализ возможностей использования лазеров для решения задач радиолокации, обработки, хранения и передачи информации. К концу 1961 г. мы представили научный отчет, в котором был предложен и обоснован ряд важных применений, а также программа развития работ по их реализации, включая создание необходимой элементной базы.

Результатом наших предложений явилась постановка научно-исследовательской работы "Коралл", которая завершилась в 1965 г. несколькими томами отчетов по реализации различных радиооптических систем¹. При этом помимо проработки очевидных применений (авиационные дальнометры на твердотельном лазере, фазовые высотомеры на полупроводниковом лазере, авиационная система разведки местности на аргоновом лазере), которые в дальнейшем успешно проводились как самостоятельные промышленные разработки, были и новые предложения. Одно из них базировалось на использовании доплеровского смещения частоты (которое в оптическом диапазоне на несколько порядков больше, чем в радиодиапазоне) для повышения точности измерения скорости и других навигационных характеристик. Другое предложение было связано с лазерными методами записи и обработки информации.

В одном из томов отчетов² изложена теория оптических генераторов, а также приведены полученные приближенные уравнения в виде, позволяющем легко исследовать различные режимы генерации и усиления лазерного излучения. В результате были поняты и оптимизированы требования к различным элементам (зеркала, конструкции резонатора, спектры ламп накачки, конструкция системы накачки, просветление торцов и др.), что позволило в дальнейшем реализовать высокую эффективность излучения лазеров на рубине и гранате и достичь рекордных уровней мощности излучения, в том числе для лазеров с модулированной добротностью.

Вместе с тем были установлены определенные ограничения возможностей повышения мощности путем усиления в активной среде (было введено понятие "эффективная длина").

Важным результатом проделанной работы стало развитие элементной базы в стране, которое проводилось нами на основе широкой кооперации и тесного контакта с физическими институтами (ФИАН, ИКАН, Гиредмет и др.) и промышленными организациями разных министерств. Это касается ламп накачки и кристаллов, зеркал и интерференционных покрытий и других элементов, необходимых для разработки высокоэффективных лазеров, а также некоторых устройств лазерной техники. Среди них я бы отметил "оптический вентиль", который был создан на основе эффекта Фарадея в тербиевом кристалле. Это дало возможность впервые реализовать лазер на оптическом резонаторе с бегущей волной.

К заметным результатам относится и создание мощного лазера на рубине с большой частотой импульсов

излучения, который демонстрировал потенциальные возможности лазеров, а также первого промышленного лазера на рубине, который с помощью сотрудников будущего Института физических исследований АН Арм.ССР был внедрен на заводе в г. Арзни и был доступен для организаций, что помогло развитию исследований в коллективах, начинающих деятельность в области лазерной техники.

В процессе проведения указанной работы быстро формировался новый коллектив молодых научных сотрудников. В результате к моменту завершения работы был создан мощный научный центр (впоследствии преобразованный в Институт радиооптики Министерства радиопромышленности) по развитию и применению лазерной техники для решения задач радиопромышленности. (Аналогичные центры создавались в других министерствах.) Немаловажную роль в развитии этого центра сыграла базовая кафедра МФТИ, которой я заведовал с 1957 г. и которая была частично переориентирована на подготовку молодых специалистов для исследований в области квантовой электроники и лазерной техники. Этому способствовало также быстрое издание упомянутой выше книги по оптическим генераторам, поскольку в то время не было каких-либо учебных пособий по лазерам, за исключением статей и обзоров (среди них хотелось бы особо выделить статью Н.Г. Басова, О.Н. Крохина и Ю.М. Попова в *УФН* 72 (2) 161 (1960), в которой к тому же впервые предложена идея реализации полупроводниковых лазеров).

Надо отметить, что после создания первых лазеров появилось большое количество разнообразных предложений по их применению в тех или иных областях науки и техники. Действительно, огромная мощность в узком спектре и возможность реализации коротких во времени импульсов излучения породили массу идей самых разнообразных применений в технологии и медицине, в локации и дальнометрии, в измерительной технике и анализе материалов, в системах связи и в телевидении, в системах записи и обработки информации и в других областях. По мере совершенствования лазеров и элементной базы целый ряд применений начал прорабатываться в различных институтах. Это прежде всего относится к системам измерения дальности и использования в технологии и медицине. Наряду с этим продолжались поиски новых, более экзотичных областей применения мощных лазеров. В качестве примера следует упомянуть проблему "лазерного термояда", впервые выдвинутую Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным.

Для радиоэлектронных систем принципиально важным параметром является высокая когерентность излучения. Вместе с тем во всех лазерах используются оптические резонаторы, размеры которых во много раз больше длины волны. В результате этого одновременно возбуждается большое число собственных колебаний на разных частотах и со случайными фазами, что определяет низкую пространственную и временную когерентность. Вследствие этого, например, диаграмма излучения получается "изрезанной", а в случае фокусировки размер пятна существенно превосходит дифракционный предел. Поэтому наши усилия при разработке лазеров были направлены на поиск и создание эффективного метода селекции колебаний, который может обеспечить генерацию лазерного излучения на одной низшей (поперечной) моде, причем без заметного снижения мощности

¹ С результатами НИР "Коралл" были широко ознакомлены коллективы академических и промышленных институтов, занимающихся различными проблемами развития лазерной техники.

² Он был издан в виде книги Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. *Оптические генераторы на твердом теле* (М.: Наука, 1967), которая широко использовалась физиками и другими специалистами в области квантовой электроники.

излучения. Такой метод был заимствован из теории волноводных резонаторов, близких к "предельному". В результате мы впервые реализовали одномодовый (гелий-неоновый) лазер, имеющий дифракционную расходимость излучения [1], а несколько позже — рубиновый одномодовый лазер, с помощью которого была впервые реализована импульсная голограмма [2].

3. Координация работ по развитию лазерной техники

В начале 60-х годов был создан Межведомственный совет по квантовой электронике под председательством заместителя Министра радиопромышленности, объединивший ведущих специалистов АН СССР и различных министерств для координации деятельности по развитию и применению лазеров. Это, безусловно, способствовало тесным контактам между коллективами различных институтов.

В объединении усилий по развитию лазеров и их применений в нелинейной оптике определенную положительную роль сыграли научные конференции, которые ежегодно организовывались Р.В. Хохловым по линии Совета по когерентной и нелинейной оптике.

В 1967 г. при содействии Н.Г. Басова и А.М. Прохорова я взял на себя организацию 1-й Всесоюзной конференции по квантовой электронике с приглашением иностранных ученых. Она предшествовала очередной конференции по когерентной и нелинейной оптике, которую организовывал Р.В. Хохлов. Это помогло привлечению к участию в обеих конференциях ведущих зарубежных ученых в области квантовой электроники, налаживанию контактов, которые способствовали бы активному участию наших специалистов в будущих конференциях по квантовой электронике, регулярно проводимых за рубежом.

В 1968 г. по инициативе Межведомственного совета по квантовой электронике была проведена первая Всесоюзная конференция по применению лазеров, а в начале 70-х годов вышел в свет первый номер нового журнала *Квантовая электроника* (сначала в виде сборника статей, а затем в виде самостоятельного журнала АН СССР). В организации этого ежемесячного издания большую роль сыграл Н.Г. Басов. Он и стал первым главным редактором журнала (с заместителями Р.В. Хохловым и мною).

На этих конференциях мы впервые выдвинули идею применения лазеров и методов голографии для записи информации с высокой плотностью и создания новых систем хранения информации. Постепенно направленность работ Института радиооптики все больше концентрировалась на системах записи, хранения и обработки информации, использующих лазеры и принципы голографии. Однако прежде чем переходить к этой области применения, следует рассказать о применениях лазерной техники в системах связи.

4. Создание первого оптического волновода — начало развития волоконно-оптических линий связи

В 1968 г. произошло важное событие, которое существенно расширило область применения лазерной техники. В Японии был экспериментально продемонстрирован первый оптический волновод, реализованный в виде диэлектрического волокна с переменным показателем преломления, идея которого и теория впервые были предложены в нашей стране в 1951 г. [3] и в дальнейшем получили широкое признание как у нас, так и за рубежом.

Создание первого оптического волновода открыло возможность передачи огромных объемов информации с высокой скоростью. Большую роль в развитии этого нового направления лазерной техники сыграл А.М. Прохоров, который возглавил работы по созданию волоконных световодов с низкими потерями и малой дисперсией, организовав широкую кооперацию специалистов в области материаловедения, специальных технологий и физических исследований. Полученные результаты и перспективность их применения стимулировали впоследствии создание самостоятельного института, который возглавляется учеником А.М. Прохорова Е.М. Диановым, продолжающим успешно развивать это важное направление. В настоящее время мы не успеваем следить за постоянным ростом информативности волоконно-оптических линий связи и новыми направлениями развития лазеров, использующими явления в волоконно-оптических волноводах.

5. Создание первой голографической системы памяти — начало развития параллельных методов записи и обработки информации

Теперь я вкратце остановлюсь на развитии работ по голографическим методам записи, хранения и обработки информации, в том числе по созданию голографических систем памяти. Они разрабатывались со значительным опережением аналогичных работ за рубежом. В первой половине 70-х годов мы завершили эту разработку выпуском нескольких опытных образцов на специализированном заводе и приступили к этапу испытаний.

Разработка первой голографической системы памяти была с самого начала привязана к конкретному радиоэлектронному комплексу и поэтому должна была удовлетворять жестким требованиям не только по техническим характеристикам, но и по условиям применения (температуре, влажности, виброустойчивости и др.). Это, конечно, усложняло разработку необходимой новой элементной базы, но вместе с тем придавало законченность и полезность создаваемым элементам и устройствам лазерной техники, которые могли быть широко использованы и для других применений.

Устройство голографической системы памяти с произвольным поиском массивов информации показано на рис. 1. Там же приведена фотография опытного образца (в нижней части голографического устройства размещены блоки питания и вспомогательная электроника).

Главной особенностью этой системы является высокая скорость считывания (порядка 10 Гбит с^{-1}), причем считывание нужного многозарядного числа из массива осуществляется всего лишь за $0,1 \text{ мкс}$ одномодовым гелий-неоновым лазером милливаттной мощности. Это достигнуто благодаря применению фотоприемника в виде специально созданного ЭОПа, усиливающего яркость сигнала, считанного с микроголограммы и преобразующего сигналы из красной области в зеленую (где чувствительность фотоумножителей максимальна), которые затем по стекловолоконкам попадают на решетку компактных ФЭУ и считываются в виде цифровых сигналов.

Второе уникальное оптоэлектронное устройство — созданный в Институте радиооптики многокаскадный электрооптический дефлектор на кристаллах ниобата лития с высоким быстродействием. Потребовалось значительно усовершенствовать технологии по созданию

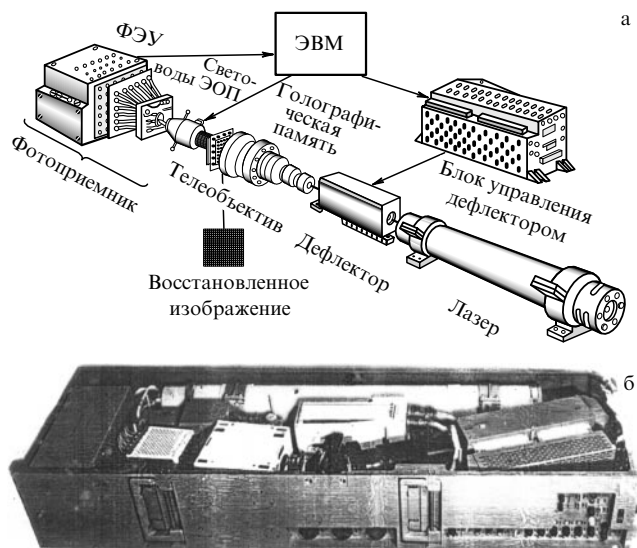


Рис. 1. Схема (а) и опытный образец (б) голографической системы памяти с произвольной выборкой информации.

сверхчистых кристаллов ниобата лития, что было достигнуто другими участниками работ. На рисунке 2 показаны фотографии лазерных пятен, создаваемых дефлекторами на 1024 и 4096 положений, и фотография опытного образца с временем переключения порядка 1 мкс.

Наконец, еще один результат, также важный для развития новых применений лазерной техники, связан с созданием быстродействующих пространственно-временных модуляторов для записи электрической информации в виде голограмм, поскольку существующие пространственно-временные модуляторы на жидких кристаллах очень медленные. Оперативный ввод информации в носитель памяти осуществлялся с помощью двумерного электрически управляемого пространственного модулятора, использующего эффект Фарадея. При этом были разработаны специальные двумерные структуры на основе ортоферрита иттрия с висмутом и пленок граната. Под действием электрических сигналов, протекающих в системе ортогональных проводников, определенные ячейки перемагничивались, что фиксировалось поворотом плоскости поляризации проходящего света. На рисунке 3 представлены фотографии одного из

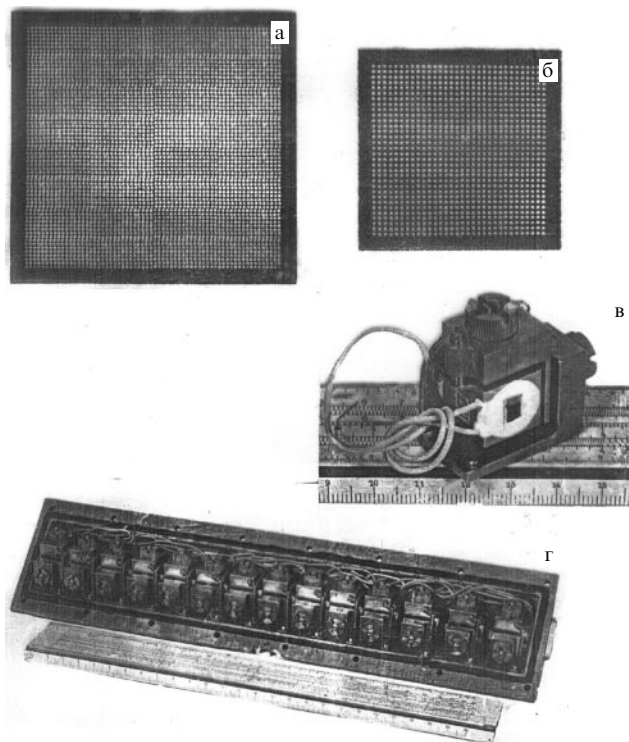


Рис. 2. Фотографии лазерных пятен, создаваемых дефлекторами на 4096 (а) и 1024 (б) положений, и опытный образец электрооптического дефлектора на кристаллах ниобата лития с быстродействием 1 мкс (в, г).

созданных образцов (а), транспаранта (б), снятого в лазерном свете, и изображения, восстановленного с микроголограммы (в), в которой был записан этот транспарант. Создание магнитооптических пространственно-временных модуляторов потребовало разработки новых материалов: ортоферрита иттрия и пленок граната с большим полем коэрцитивности и высокой скоростью движения доменной стенки. Это позволило реализовать скорость ввода информации порядка 10^8 бит s^{-1} при высоком контрасте между нулем и единицей (порядка 300).

Реализация новых устройств лазерной техники проводилась в тесном контакте Института радиооптики с многочисленными институтами Академии наук и про-

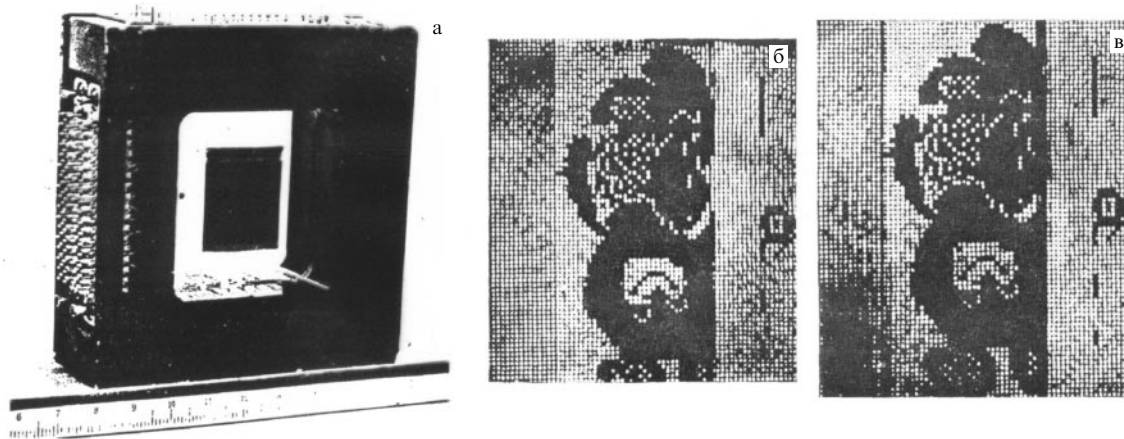


Рис. 3. (а) Магнитооптический двумерный управляемый пространственно-временной модулятор, (б) оригинал транспаранта, (в) восстановленное изображение.

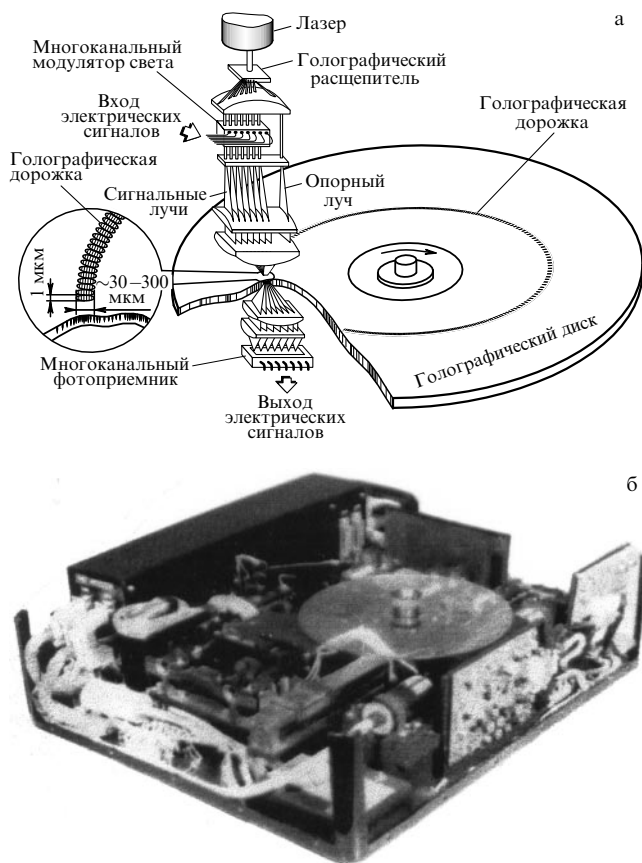


Рис. 4. Схема (а) и образец (б) дисковой системы памяти на одномерных голограммах.

мышленных министерств. Это касается, прежде всего, создания технологии изготовления сверхчистых кристаллов ниобата лития, пленок граната, иттриевого ортоферрита, мелкозернистых малошумящих фотоэмульсий, специальных волоконных элементов, специальных ЭОП с малой дисторсией, матрицы фотоумножителей, специализированной широкоугольной оптики, новых материалов для перезаписи голограмм (бактериородопсин, фотохромные пленки, фотополимеры), узкополосных фильтров на отражательных голограммах из ниобата лития с примесями железа, объемных голографических элементов памяти и др.

В еще одном новом, весьма перспективном голографическом устройстве памяти используется принцип параллельной записи большого числа сигналов на движущийся носитель. В варианте диска, показанного на рис. 4, запись осуществляется на широкую дорожку в виде одномерных голограмм. По сравнению с дисками (магнитными и оптическими), широко применяемыми в настоящее время, голографическая дисковая память имеет ряд преимуществ (более высокая скорость записи и считывания, возможность использования более информативных толстых носителей и др.), что делает их также весьма перспективными для применения в нейрокомпьютерах.

Все указанные выше оптоэлектронные устройства описаны более подробно в монографии автора *Оптические методы в информатике* (М.: Наука, 1990), где есть также ссылки на оригинальные статьи. Несмотря на то, что прошло уже более 30 лет с момента создания некоторых из описанных устройств лазерной техники,

они до сих пор отсутствуют за рубежом. Что же касается работ по созданию голографических систем памяти, то за рубежом они стали серьезно прорабатываться лишь с начала 90-х годов в связи с быстро возрастающими требованиями к информационным системам. Такие программы развернуты сейчас в США и в Европе.

6. Заключение

В дальнейшей деятельности мы не избежали трудностей, с которыми столкнулись научно-исследовательские институты, занимающиеся перспективными разработками для промышленности, которые стали невостребованными в нашей стране.

В середине 90-х годов в Российской академии наук был создан Институт оптико-нейронных технологий с целью развития работ по исследованию и применению новых методов обработки информации на принципах голографии и нейронных систем. Я стал директором этого института, были привлечены также некоторые ведущие сотрудники, с которыми я работал раньше, имеющие большой опыт научных исследований. Наша задача — сохранить научную школу подготовки молодых ученых по указанному весьма перспективному направлению и найти области применения новых, освоенных нами голографических методов обработки информации для решения практически нужных задач (не ограничиваясь лишь интересами развития радиоэлектронных систем). И первые результаты мы уже получаем в направлении развития голографических наноструктур и ассоциативных методов обработки сигналов с использованием принципов функционирования нейронных структур. Надеемся, что эти результаты будут востребованы в нашей стране.

Список литературы

1. Микаэлян А Л, Коровицын А В, Наумова Л В *Письма в ЖЭТФ* 2 (1) 37 (1965)
2. Микаэлян А Л, Турков Ю Г, Сахарова Н А *Письма в ЖЭТФ* 5 (5) 148 (1967)
3. Микаэлян А Л *ДАН СССР* 81 569 (1951)

PACS numbers: 01.65. + g, 42.55. – f, 42.62. – b

Развитие лазерной физики в Белоруссии

П.А. Апанасевич

Исследования в области квантовой электроники¹ начали развиваться в Белоруссии практически сразу после создания в 1960 г. первого лазера. Уже в 1961 г. были опубликованы статьи Б.И. Степанова с сотрудниками по теории лазерной генерации [1–3]. В 1963 г. был запущен В.А. Пилиповичем первый в Белоруссии лазер на рубине и начались экспериментальные исследования в этой области. В течение 2–3 лет проблемы лазерной физики и нелинейной оптики быстро заняли ведущее место в тематике Института физики АН БССР.

С самого начала эти исследования были развернуты широким фронтом. Основное внимание при этом уделя-

¹ Термин лазерная физика стал широко употребляться в 70-е годы. До этого лазерная физика не была выделена в самостоятельное научное направление и лазер, как правило, назывался оптическим квантовым генератором (или просто ОКГ).