

СТРАСТИ ПО ЛАЗЕРУ

Ю.Носов, д.т.н., А.Сметанов, д.э.н., ОАО "НПП "Сапфир" info@sapfir.ru

Полвека тому назад, 1 ноября 1962 года, в авторитетном американском публикаторе новинок физики Physical Review Letters появилось краткое сообщение о создании твердотельного прибора, "в котором осуществляется прямое преобразование электрической энергии в когерентное инфракрасное излучение". Так был заявлен полупроводниковый инжекционный лазер или лазерный диод, который со временем стал неотъемлемым элементом электроники, дополнив транзистор и микросхему там, где для расширения возможностей информатики необходимо оперировать с оптическими сигналами. В непростой и увлекательной истории инжекционного лазера активно участвовали отечественные ученые.

ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕТРОСПЕКТИВА

Четыре прибора определяют важнейшие реперные точки истории квантовой электроники. **Мазер** (Ч.Таунс, 1954 г.) обозначил само рождение этой научно-технической дисциплины, связанной с приборами, использующими стимулированное излучение. **Лазер** (Т.Мейман, 1960 г.) ознаменовал ее переход на высшую ступень развития – лазерную физику и технику. Полупроводниковый **инжекционный лазер** (Р.Холл, 1962 г.) утвердил универсальность принципов квантовой электроники и породил надежду на развитие оптоэлектроники как специфической сферы информатики. **Гетеролазер** (Ж.И.Алферов, 1968 г.) превратил эти надежды в реальность благодаря кардинальному изменению физических основ и устройства инжекционного лазера. Напомним, что МАЗЕР – это акроним словосочетания Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, а ЛАЗЕР – то же самое с заменой первого слова на Light (оба термина предложены Ч.Таунсом).

Подчеркнем, что указанные авторы и даты относятся к созданию приборов, образующих основу и стержень нового научно-технического направления; прочее – предсказания, теории,

исследования, создание необходимой инфраструктуры, применение* – мы упоминаем лишь постольку-поскольку. По-видимому, не все согласятся с выделенными нами четырьмя приборами, и это естественно: общественное мнение формировалось по горячим следам, отражая сиюминутность оценок, а корректное представление может дать только историческая ретроспектива – "большое видится на расстоянии". К юбилею первого лазера издан прекрасный четырехтомный сборник воспоминаний о становлении квантовой электроники в нашей стране [1], интересующихся подробностями процесса отсылаем к нему. Цель же настоящей статьи – история появления тех или иных приборов впервые в мире, а как известно, в мазерно-лазерной "большой гонке" мы шли вторым номером за американцами, лишь изредка подравниваясь или вырываясь вперед.

История выделенных четырех приборов столь нерасторжима и спрессована во времени, что

* С горечью констатируем, что часто успешным примененцам достается больше славы, чем разработчикам изделия. Так, широко известны имена создателей модных поисковиков Интернета. А кто назовет создателей собственно Интернета как материальной субстанции, например, создателей волоконной связи?

полное вычленение какого-либо из фрагментов представляется исторически некорректным.

ОТ ПЕРВОГО МАЗЕРА К ПЕРВОМУ ЛАЗЕРУ: ШЕСТЬ ЛЕТ НА ОДНОМ ДЫХАНИИ

Представление о *стимулированном излучении*, сформулированное А.Эйнштейном в 1916 году и позднее дополненное П.Дираком, заключается в том, что при сильном возбуждении некоторых веществ возникает *инверсия населенностей* – резко неравновесное состояние, при котором на верхних энергетических квантовых уровнях оказывается больше электронов, чем на нижних. Возврат этих веществ в равновесное состояние сопровождается особым видом излучения – стимулированным или индуцированным, вынужденным излучением. Стимулированное излучение характеризуется высокой монохроматичностью, острой направленностью луча и другими свойствами когерентности. При слабом возбуждении тех же веществ существует лишь спонтанное излучение, лишенное признаков когерентности, для перехода от одного режима к другому интенсивность возбуждения (или накачки) должна превысить некоторый порог. За порогом возникает сверхлинейная зависимость интенсивности генерации, а также резкое сужение спектра генерации, усиливаемое размещением активного вещества в резонаторе, настроенном на частоту генерации. Эта конкретизация теории Эйнштейна относится к 1950-м годам.

Состояние оптики в течение долгого времени не позволяло проверить теоретические предсказания, реальное "приглашение к эксперименту" поступило от радиофизиков, которые в годы Второй мировой войны оказались вовлеченными в радиолокационный проект. Благодаря этим работам была создана СВЧ-техника, а также возникло новое научно-техническое направление – радиоспектроскопия как метод анализа квантовой структуры атомов и молекул, что потребовало разработки способов получения атомно-молекулярных пучков в вакууме.

В итоге сформировалось специфическое инженерно-физическое научное сообщество, среди членов которого были Нобелевские лауреаты И.Раби, Э.Перселл, П.Куш, У.Лэмб – в основном сотрудники Колумбийского и Гарвардского университетов, Массачусетского технологического института (MIT), а также AT&T Bell Labs.

Из этой среды и вышел Чарльз Таунс, прошедший школу Bell Labs и перешедший в 1948 году в Колумбийский университет. Идея использовать

стимулированное излучение для повышения чувствительности радиоспектрометра логично привела его уже в 1951 году к концепции мазера, который и был им создан в начале 1954 года [2, 3]. Это устройство, использующее пучок молекул аммиака, генерировало стимулированное излучение частотой $f \approx 24$ ГГц с относительной шириной спектра $\Delta f/f \approx 10^{-12}$ – предсказание Эйнштейна получило блестящее экспериментальное подтверждение.

В том же 1954 году обнаружилось, что независимо от Таунса и почти одновременно с ним к концепции мазера пришли Н.Г.Басов и А.М.Прохоров в московском Физическом институте АН (ФИАН). Они создали первый советский действующий образец в 1955 году [4, 5].

Главным техническим применением новых приборов стали стандарты частоты и системы точного времени. После изобретения твердотельных мазеров (Н.Бломберген, 1956 г.* [6]) началось их использование в качестве усилителей с рекордно низким уровнем собственных шумов. Мазеры позволили уточнить значение скорости света, наиболее строго подтвердить справедливость теории относительности, обнаружить реликтовое излучение расширяющейся Вселенной (Нобелевская премия-1978).

Однако традиционной – магнетронно-клистронной – СВЧ-электронике мазеры ничего не дали и не могли дать: интенсивность их излучения составляла 10^{-10} – 10^{-8} Вт, а о КПД речь вообще не шла, столь ничтожным он был. Все понимали, что настоящим полем деятельности квантовых генераторов может стать только оптический диапазон. Ведь именно на него ориентировалась теория Эйнштейна. Яснее всего это осознавали сами первопроходцы квантовой электроники – старт лазерной гонке дала статья [7], главная "фишка" которой заключалась в названии "Инфракрасные и оптические мазеры". Хотя инициатором публикации был А.Шавлов, в ту пору авторитет отнюдь не первого ряда, все увидели в ней указующий перст патриарха Ч.Таунса. Цель была обозначена четко – лазер**, однако пути ее достижения указывались фактически тупиковые, что вскоре и подтвердилось. Предлагалось концепцию

* Его приоритет не бесспорен: трехуровневую схему возбуждения – основу твердотельного рубинового мазера – независимо предложили А.М.Прохоров (1955 г.) и Ч.Таунс (1956 г.), а первые действующие образцы были изготовлены в 1957–1958 годах.

** Самого этого термина, придуманного Таунсом позднее, в статье нет. Вместо него используются "оптический мазер" (строго говоря, оксюморон), "мазероподобный прибор".

мазера один в один перенести в оптический диапазон, только вместо молекул аммиака использовать пары калия. Но на резонаторе авторы, естественно, "забуксовали" и пустились в бесконечные рассуждения о селективности мод, как бы не заметив уже предложенный А.М.Прохоровым [8] и американцем Р.Дикке "резонатор открытого типа", т.е. два параллельных зеркала. О других, не газовых, лазерах в статье [7] – только сомнения, слов "рубин" и "полупроводник" вообще нет. И все же статья [7] стала запалом Большого взрыва, породившего лазерную Вселенную, расширяющуюся и поныне. Такова сила Слова, сказанного лидером, – подчеркнем это.

Первый лазер, вопреки [7], был создан Теодором Мейманом из фирмы Hughes (Малибу, шт. Калифорния) 16 мая 1960 года. Это был импульсный рубиновый лазер, презентация которого состоялась 7 июля в Нью-Йорке [9, 10]. Публике был представлен сантиметровый рубиновый стержень с посеребренными торцами и пристроенной к нему лампой-вспышкой – "и это лазер, над которым бились лучшие умы?". У тех, кто занимался лазерами, "вдруг" все стало получаться – в течение лета-осени 1960 года было изготовлено несколько прототипов, и все лучше "меймановского". А в конце 1960 года состоялось и другое важное событие – Али Джаван, ученик Таунса, используя смесь гелия с неоном, создал газовый лазер непрерывного действия с высокой степенью когерентности излучения [11]. В течение трех лет мировая армия лазерщиков выросла до 500 (!) исследовательских групп, и это было лишь началом бума.

У нас в стране рубиновый лазер создали в 1961 году – на первенство претендуют ФИАН и Государственный оптический институт (ГОИ)* – для нас же знаменательно то, что рубин для этого был синтезирован в СКБ-311** и, по авторитетному свидетельству В.Г.Дмитриева, той же весной 1961 года его лазерное свечение (без претензии на создание лазера как прибора) наблюдали А.С.Бибчук и Ю.Н.Соловьева. Заметим еще, что ближе всех к созданию рубинового лазера, даже раньше 1960 года, был А.А.Маненков, аспирант А.М.Прохорова в 1953–1955 годах. Четко представляя ключевые компоненты будущего лазера – активную среду, способ накачки, резонатор, Саша закопался с поиском источника света

и упустил жар-птицу. Как физик, он стремился подобрать оптимальный источник (но такого не существовало), а Меймана вел азарт золотоискателя – застолбить! "...Т.Мейман это сделал первый. И тут уж ничего не поделаешь, как говорится" (А.М.Прохоров). Реплика, достойная большого человека.

Вот штрихи из биографии Меймана. С 14 лет Тэдди начал заниматься ремонтом радиоаппаратуры, получая 25 центов в час, из-за переезда семьи не закончил школу, в 17 лет поступил на флот. Вроде бы изобретательный умелец-самоучка, таким его многие и видели. Но в 16 лет он опубликовал первую научную статью, и после окончания Колорадского университета прорвался, завоевав грант, в аспирантуру к "самому" У.Лэмбу ("лэмбовский сдвиг", Нобелевская премия-1955) в Стэнфордском университете. А когда Лэмб переехал в Европу, он бросил все и отправился на "80 дней вокруг света". Очень возбудимый, непоседливый, обидчивый до капризности. И – болезненно амбициозный. А кроме всего, "он обладал мужеством слушать себя, когда все говорили, что он неправ".

Открытие-изобретение Т.Меймана было холодно воспринято "браминами"*** Восточного побережья. Остановить газетную трескотню о "научном приборе, сделанном из света", о "поразительном открытии лучей смерти" было невозможно, но в "серьезной" литературе все определеннее утверждался тезис: "После выхода статьи [7], в которой авторы объяснили, как это сделать, Мейман продемонстрировал первый действующий лазер; в том же году А.Шавлову удалось построить лазер". В оборот была пущена шутка, что меймановский лазер – "это решение, ищущее проблему".

Антиподом Меймана выступил А.Шавлов. После получения степени PhD в университете Торонто (1949 г.) он начал работать с Таунсом, женился на его младшей сестре (1951 г.) и погрузился в написание объемистой совместной монографии "СВЧ-спектроскопия". Книга увидела свет в 1955 году, однако в соавторы мазера он не попал. Но после публикации статьи [7] он проявил настойчивость, совместно с Таунсом сумел получить пионерский патент на лазер и все было бы хорошо, если бы "калифорнийский недоучка" не изобрел нечто совсем другое, не подпадавшее под этот патент. Более того, на всех конференциях

* Интересующихся их полемикой отсылаем к [1, т.2].

** Это часть того предприятия, которое теперь известно как НПП "Сапфир".

*** Так называли интеллектуалов Бостона, а иногда также – Гарвардского, Йельского, Колумбийского университетов.

и встречах с прессой тот демонстрировал свой первый образец и язвительно осведомлялся "а где же ваш?". Две амбициозности, два непримиримых еврейских темперамента вошли в клинч и "потопили" друг друга. Создание лазера фактически открывало дорогу к Нобелевской премии за "мазерно-лазерный принцип"*, и тройка лауреатов Таунс-Мейман-Шавлов была бы с пониманием принята общественностью, не будь той склоки. О советских физиках, вне зависимости от их достижений, в 1961-1962 годах не могло быть и речи: возведение Берлинской стены (август 1961 г.), испытание супербомбы на Новой Земле (декабрь 1961 г.), наконец, Карибский кризис как вероятный термоядерный апокалипсис (октябрь 1962 г.) породили в мире небывалую волну антисоветизма.

Но кризис миновал, мир вздохнул облегченно, Кеннеди и Хрущев от угроз перешли к уверениям в вечной дружбе – вот в этот момент в 1963 году директор ФИАН Д.В.Скобельцын, авторитетный ученый и искуснейший политик от науки, выдвинул Таунса, Басова и Прохорова на Нобелевскую премию, которую они вполне заслуженно и получили в 1964 году. Все предшествующее этому году было накрыто их наградой. Заметим, что А.Шавлов ("За вклад в развитие лазерной спектроскопии", совместно с Н.Бломбергенем) добился таки Нобелевской премии в 1981 году, а Т.Мейману оставалось до конца жизни довольствоваться лишь всемирной славой создателя первого лазера.

ВОЗМОЖЕН ЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР?

Рождение лазера вдохнуло жизнь во многое, что возникло еще в долазерную эпоху, но пребывало в эмбриональном состоянии из-за отсутствия интенсивных источников когерентного излучения. Голография, изобретенная Д.Габором в 1948 году, была отмечена Нобелевской премией 1971 года лишь после того, как в 1963 году американец Э.Лейт и ленинградец Ю.Н.Денисюк изготовили качественные лазерные голограммы. Нелинейная оптика заявила о себе еще в 1923 году (С.И.Вавилов, В.Л.Лёвшин), но заявила чуть ли не шепотом, так что слышали лишь историки науки**, а в 1961 году американец П.Франкен получил генерацию второй гармоники*** рубинового лазера в кварцевом кристалле, и началась

стремительная раскрутка старого-нового направления – уже в 1964 году появились основополагающие монографии по нелинейной оптике (Н.Бломберген в США, Р.В.Хохлов и С.А.Ахманов – в СССР).

Естественно, что почти сразу же лазер, как потенциальное "абсолютное оружие" ("гиперболоид инженера Гарина"), стал средством давления на государство и общество с целью финансирования фантастогорических лазерных проектов систем противоракетной обороны (ПРО). Генералы и ученые действовали солидарно, сложившийся во время войны военно-промышленно-академический комплекс (выражение сенатора Дж.Фулбрайта, более точное, чем принятое у нас ВПК) с годами упрочивался и становился ненасытнее. Тенденция, общая для "них" и для "нас", вне зависимости от различия господствующих политико-социальных идеологем.

Лазеры начали применяться в точном приборостроении, медицине, химической технологии и многих других областях, но оставалась и очень значительная недоступная им территория. Древнейшая идея использовать оптические сигналы в информатике впервые обрела контуры технического проекта в 1955 году (Е.Лёбнер), хотя убогость тогдашних излучателей не столько утверждала его идею, сколько ее дискредитировала. Однако решающее Слово – оптоэлектронный прибор, оптоэлектроника – было сказано. Дело оставалось за "малым": создать источник света под стать транзистору – миниатюрный, эффективный, надежный. Таков "социальный заказ" на полупроводниковый лазер. Разумеется, разработки шли в своих исследованиях от внутренней логики развития полупроводниковой науки и техники (такова философская концепция "автономной технологии"), "социальный заказ" начинает осознаваться позднее – на этапе расширенного применения созданного изделия.

Интерес к полупроводникам первым проявил еще в 1957 году Н.Г.Басов и привлек к этому теоретиков Ю.М.Попова и О.Н.Крохина, а также экспериментаторов лаборатории Б.М.Вула. В период до 1961 года появилось несколько их заявочных статей, в которых сформулировано необходимое условие получения инверсии населенностей – использование вырожденного полупроводника [12, 13].

В реалиях того времени для американцев, как будущих создателей первых лазеров, умозаключения наших теоретиков никакой роли не сыграли. На полупроводники они обратили внимание

* Именно это вошло в формулу Нобелевской премии-1964.

** Позднее С.И.Вавилов ввел в оборот сам термин "нелинейная оптика" – это принципиально.

*** Это один из определяющих нелинейно-оптических эффектов.

после появления рубинового лазера Т.Меймана – надо дерзать! Что касается вывода о необходимости использовать вырожденные полупроводники, то в 1961 году он был повторен в статье [14] (с добросовестной ссылкой на наш приоритет [12]) и дополнен многими другими условиями, важными для практиков. Кроме того, работа [14] выгодно отличалась четкостью названия "Условия для полупроводникового лазера" и англоязычностью*.

Был и еще один – случайный – момент: М.Бернар, автор работы [14], в 1962 году проходил годичную стажировку в General Electric. Р.Холл дискутировал с ним и в своем сообщении о первом лазере, естественно, сослался на [14]. Эта ситуация получила почти зеркальное повторение: в декабре 1961 года Ю.М.Попов, будучи на стажировке в Гарвардском университете, доложил на семинаре работы [12, 13], а затем повторил выступление в Колумбийском университете. После чего присутствовавшие М.Натан и П.Сорокин пригласили его в ресторан, где продолжили расспросы о работах ФИАНа; однако ссылок на [12, 13] в "лазерной публикации" Натана нет – американцы тоже бывают разные.

Теоретические проработки [12-14], формулируя важное необходимое условие, не ответили на главный вопрос: возможен ли в принципе полупроводниковый инжекционный лазер? Этот вопрос стоял еще применительно к рубину, существовало представление о резком возрастании спонтанной генерации при переходе от СВЧ-диапазона к оптическому, и было сомнительно, что удастся превзойти ее стимулированным излучением.

Еще безнадежнее виделась ситуация с полупроводниками, где каналов безызлучательной рекомбинации было великое множество, в особенности в сильнолегированных полупроводниках. Р.Холл был одним из авторов теории рекомбинации в германии и кремнии (1952 г.), потому-то еще в начале 1962 года он считал, что *полупроводниковый лазер невозможен*. А теоретические работы [12-14] отличались заметным схематизмом, рассматривая некий идеальный бездефектный полупроводник; когда же теоретики пытались перейти к практическим рекомендациям, то почему-то склонялись преимущественно к антимониду индия. Не придавала уверенности в успехе

и статья Д.Н.Наследова и др. [15], которую отечественная историография частенько характеризует как первое экспериментальное получение стимулированного излучения арсенидогаллиевых р-п-переходов. Повышая прямой ток GaAs-диодов, авторы [15] заметили незначительное сужение спектра излучения (на ~3%), что попытались связать с началом стимулированной генерации (проблема, как говорится, витала в воздухе и очень хотелось "быть первыми"), но сами же отказались от этого и дали другое объяснение. Тем не менее, статья произвела некоторое возбуждающее действие: решающее Слово – стимулированное излучение – было произнесено учеными ленинградского Физтеха, который занимал ведущие позиции в исследовании арсенида галлия**.

ПОБЕДИТЕЛЯ ГОНКИ ОПРЕДЕЛЯЛ ФОТОФИНИШ

Итак, к весне 1962 года в нескольких фирмах сформировались четыре группы, нацелившиеся на полупроводниковый лазер: две – в General Electric (Р.Холл, Исследовательская лаборатория в Скенектади, и Н.Холоньяк, Лаборатория перспективных полупроводников в Сиракузах); в IBM (М.Натан); в Лаборатории Линкольна MIT (Р.Редикер, Р.Кейес). Все размещались неподалеку друг от друга: первые три – в штате Нью-Йорк, четвертая – в Массачусетсе, это способствовало общению. У нас реальный лазерный проект существовал только в лаборатории Б.М.Вула в ФИАНе.

До лета занимались по большей части взаимным обучением: физики-"полупроводникосты" овладевали лазерной премудростью, лазерщики влезали в физику полупроводников, но менее успешно. По сути, никто не знал, с чего же начинать. Вечевой колокол прозвонил на конференции в Дархэме (шт.Нью-Гемпшир) – 9 июля сразу в двух докладах сообщалось, что квантовый выход межзоновой люминесценции арсенида галлия близок к 100%. Один из докладов представили Р.Кейес и Т.Квист из Массачусетской группы. Значит, они нашли путь к лазеру? Все буквально бросились в лаборатории. Р.Холл узнал о докладе через 10 дней, его прежняя уверенность в том, что "лазер невозможен", тотчас сменилась еще большей уверенностью – лазер возможен. Теперь главное – обойти конкурентов!

* "Барьер кириллицы" вкупе с нерасторопностью наших публикаций был и остается существеннее "железного занавеса" – подавляющее большинство американцев знакомится с нашими публикациями спустя годы, обычно в каком-нибудь англоязычном обзоре.

** Это способствовало включению впоследствии авторов [15] в состав награжденных Ленинской премией-1964 за первый отечественный инжекционный лазер. Воистину, сюжет "сужения спектра" достоин пера Ч.П.Сноу (см. роман "Наставники").

За плечами у Холла был 15-летний опыт приборных разработок, по счастливой случайности последняя – туннельные диоды, использующие именно вырожденные полупроводники, что требовалось и лазеру. Он знал технологические тонкости, знал и то, что отработка каждого нового процесса требует времени, можно увязнуть. Поэтому один из его сотрудников начал "клепать" арсенидогаллиевые p-n-переходы (стандартный метод – диффузия цинка) в разных температурно-временных режимах – какой-нибудь подойдет! В параллель, другой сотрудник готовил измерительную аппаратуру – генератор коротких мощных импульсов тока и криогенную камеру*. Третий – обрабатывал разделку пластин на миниатюрные брусочки и полировку их торцов под резонатор. Четвертый покуривал трубку, а когда пришло время, анализировал эти крохотные светлячки – лазеры или нет?

К середине августа первые образцы были изготовлены и затем последовало несколько "безумных, неистовых недель" (выражение Холла), когда команда старалась изготовить и обследовать как можно больше диодов. 24 сентября 1962 года сообщение о "когерентном излучении света из GaAs-переходов" поступило в редакцию Physical Review Letters, уже 1 ноября статья была опубликована [16]. В тот же день в Applied Physics Letters была опубликована и коротенькая заметка от группы М.Натана [17], вполне было уверовавшего в свой приоритет, но несказанно разочаровавшегося своим более поздним (4 октября) отправлением письма. В декабре увидели свет сообщения об успехах и двух других американских групп [18,19]. Тотчас, как и при изобретении Меймана, начали говорить об *одновременности* создания инжекционного лазера несколькими группами, но теперь это имело под собой реальное основание – плотное общение всех участников гонки между собой. Наиболее уязвленным ощущал себя М.Натан, примыкавший к лазерно-мазерной школе Колумбийского университета.

Несмотря на этот "общий" настрой, приоритет Роберта Холла в создании инжекционного лазера бесспорен. И дело отнюдь не в отрыве от ближайшего преследователя на 10 дней, это можно было бы отнести к традиционной американской

щепетильности в отношении юридических формальностей**. Дело в том, что М.Натан сообщил о получении стимулированного излучения в обычных GaAs-диодах, фактически доведя до результата эксперимент ленинградских физиков [15], а Р.Холл представил миру первый инжекционный лазер, основанный на межзонных квантовых переходах и использующий встроенный резонатор.

В лаборатории Б.М.Вула первоначальные поиски ориентировались на антимонид индия, но после получения препринта статьи Р.Холла изготовили (руками А.П.Шотова) GaAs-лазер в течение пары недель декабря 1962 года, публикация традиционно затянулась до марта 1963 года [20]. Отметим, однако, что потенциал отечественных ученых-лазерщиков был столь значителен и авторитет столь высок, что при создании специализированного отраслевого института квантовой электроники – НИИ-333 (ныне НИИ "Полюс") в марте 1962 года (фактически, с учетом согласований, всего через полтора года (!) после публикации Т.Меймана) – в нем было предусмотрено подразделение полупроводниковых лазеров (В.И.Швейкин). То есть ученые ФИАНа уже тогда были уверены, что этот прибор вот-вот появится, и сумели вселить эту уверенность в министра электронной промышленности А.И.Шокина. А в 1963 году на старейших полупроводниковых предприятиях НИИ-311 (ныне НПП "Сапфир") и заводе "Старт" началась НИР по созданию промышленного GaAs-лазера по инициативе ленинградского Физтеха (Б.В.Царенков). Руководство было поручено НИИ-311 (И.И.Круглов), но фактически работа сосредоточилась на "Старте" (С.С.Мескин, Л.М.Коган), где она и была с успехом завершена, причем не только созданием известных диффузионных лазеров, но и эскизной технологией жидкофазной эпитаксии, ставшей основной на ближайшие два десятилетия.

Достаточно скоро обнаружилось, что "лазер Холла", несмотря на многочисленные технологические усовершенствования, обладает крайне низкими, с потребительской точки зрения, характеристиками: высоким порогом возбуждения, необходимостью охлаждения и импульсным режимом работы, низким КПД, высокой расходимостью светового луча, малым сроком службы, низкой надежностью. Выяснили, что

* Бьющее у нас представление, что у "них" все это можно купить в соседнем магазине или заказать по телефону, мягко говоря, поверхностно. Для новых изделий интеллектуалам-физикам все приходится мастерить самим, также как и у нас, с паяльником в руке.

** Напомним, А.Белл стал в 1876 году общепризнанным (по-американски) изобретателем телефона благодаря тому, что подал патентную заявку на два часа раньше конкурента.

это обусловлено использованием сильнолегированного вырожденного полупроводника, "расползанием" инжектированных электронов в неактивные зоны и бесполезными их потерями. Недостатки носили физически принципиальный характер, казалось, неустранимый. "Лазер Холла", как мог, сопротивлялся этому, но прожил всего 10 лет.

ГЕТЕРОЛАЗЕР – ЭПОХА ВОЗРОЖДЕНИЯ

Говорят, история не допускает сослагательного наклонения. История – нет, а историк может – рассуждения "что было бы, если бы..." порой помогают лучше понять то, что в действительности произошло*. Задержалось бы появление в мире лазера, первого лазера, инжекционного лазера, если бы в этом не участвовали советские ученые? Наш ответ – нет, все состоялось бы в те же сроки. Это не принижение роли отечественной науки, это утверждение исторически корректной истины, как мы ее осознали и здесь представили. Вопли либеральной общественности о том, почему "мы не были первыми" нам видятся столь же омерзительными, как, полагаем, и читателям. Высочайший уровень нашей академической науки обеспечил стране возможность оперативно воспринимать мировые достижения, аккумулируя их в технике и промышленности, обеспечил также, оставаясь вторым, возможность поддерживать паритет с Западом в оборонной технике (в пределах разумной достаточности), наконец, в отдельных случаях, позволял совершать и прорывы общемировой значимости. Такие, как заключительный аккорд нашего повествования – создание гетеролазера Жоресом Алферовым [21], обозначившее начало "эпохи Возрождения" истории инжекционного лазера**.

В авторской заявке на гетеролазер [22] предмет изобретения изложен в четырех с половиной строках. Идея проста: излучающая структура представляет собой "вафлю", в которой тонкий средний слой – это активная полупроводниковая область, где возникает стимулированное излучение, а обкладки "вафли", выполненные из полупроводников с более широкой запрещенной зоной, чем сердцевина, – это эмиттеры.

* "Альтернативная история", ныне модный trend.

** Титаны эпохи Возрождения стремились к возрождению утраченной греческой культуры, а фактически сформировали принципиально новую культуру, ставшую на много веков основой нашей цивилизации.

"Вафля" в целом – это единый полупроводниковый монокристалл, а не какое-то механическое "склеивание" разных пластин (пожалуй, это всем очевидно и без пояснения). Несмотря на краткость, в "предмете изобретения" оговорены электрическая накачка, т.е. инжекция носителей заряда, а также возможность варьировать свойства полупроводников для генерации излучения в различных областях спектра. Обратим внимание на приоритетную дату [22] – это всего лишь три-четыре месяца спустя после появления сообщения [16] о первом инжекционном лазере в нашей стране, т.е. фактически, с учетом времени на обдумывание и оформление, заявка [22] пошла независимо от [16]. Уверовавший в мистику скажет, что высшая сила, руководящая всеми нами, разрешив создать первый, очень несовершенный, лазер, тут же дала и надежду на его преобразование. Но в конце 1963 года появилась заметка Г.Крёмера [23]**, где он анализирует возможности гетеролазера с широкозонным эмиттером, отталкиваясь от своей же теоретической работы 1957 года. Получается, что при невозможности ("почти") создания полупроводникового лазера одни все-таки упорно добивались его создания (и добились), а другие – уже тогда задумывались, как принципиально преодолеть эту "невозможность" и создать *совершенный* инжекционный лазер. И никакой мистики. Обратим внимание, что в [23] обсуждается физика широкозонного эмиттера, т.е. рассматривается "вафля" с одной обкладкой или односторонняя гетероструктура (ОГС), а в [22] предлагается *прибор*, использующий двойную (двустороннюю) гетероструктуру (ДГС). Именно ДГС-лазер и утвердил торжество гетеролазерного прорыва.

Многие окрестили [22] "бумажным" патентом, т.е. фактически нереализуемым, и имели для этого основания: достаточно взглянуть на "пример реализации", формально обязательный для авторской заявки. Кроме того, с 1960 года было известно об экспериментальных исследованиях Р.Андерсоном гетероструктуры "германий-арсенид галлия" в надежде получить "идеальный" эмиттер для германиевых транзисторов – полный провал, коэффициент инжекции не превышал 0,1, а в транзисторах уже было достигнуто 0,995, т.е. почти 1, теоретический предел.

*** Г.Крёмер – немецкий физик-теоретик, натурализовавшийся в США. Изначально прославился разработкой теории дрейфового транзистора (1956 г.). Солауреат Ж.И. Алферова по Нобелевской премии-2000 за гетероструктуры.

Причина такого несоответствия предсказаниям теории банальна – возникновение огромной концентрации дефектов на границе раздела двух полупроводников из-за различия характеристических размеров их кристаллографических решеток. Значит, один из них (или оба) должны были прогибаться, приспособливаться, а кристаллы не люди. Это знал и Алферов, но время на дворе уже было другое – занималась заря трехкомпонентных твердых растворов полупроводников A^3B^5 , позволявших плавно изменять их свойства.

Естественно, было выбрано соединение "галлий-арсенид-фосфид", уже "окультуренное" Н.Холоньяком, но три года напряженных усилий привели лишь к очень несовершенному лазеру, работоспособному исключительно при температуре жидкого азота. Счастливая случайность вывела наконец-то (1967 г.) на подходящее соединение "галлий-алюминий-мышьяк" ($Al_xGa_{1-x}As$)*. Теперь достижение предсказываемых результатов зависело от профессионализма, энергичности, самоотдачи, оптимизма всей группы. (Автору довелось в 1968 году инициативно поработать совместно с Ж.И.Алферовым над проектом быстродействующего гетеродиода, услышать непосредственно от него о достоинствах гетероструктур и близко сойтись с его сотрудниками первого призыва: В.М.Андреевым, Д.З.Гарбузовым, В.И.Корольковым, Е.Л.Портным, Д.Н.Третьяковым.)

Группа не подвела. Открытия, теперь уже подтверждаемые экспериментально, следовали одно за другим. Не всем и не сразу, но с годами стало ясно, что гетероструктуры принесли в инжекционный лазер не просто технические усовершенствования, а принципиально новую физику. Прежде всего отпало обязательное требование вырожденности используемого полупроводника – конек теоретических исследований [12–14]. В гетеролазере активная зона стала невырожденной, слабогированной, фактически без паразитных каналов неизлучательной рекомбинации. Во-вторых, активная область геометрически строго локализовалась между двумя гетерограницами, что

устранило отток инжектируемых носителей в пассивные области (их попросту не стало). Оба эти обстоятельства снизили потери на спонтанную рекомбинацию теоретически до нуля. С другой стороны, гетерограницы как идеальные эмиттеры позволили осуществлять накачку электронов в активную область в любых количествах (суперинжекция). Перечисленные физические феномены позволили кардинально уменьшить плотность порогового тока – параметра, определяющего рабочую температуру, долговечность, наконец, КПД лазера. Надо ли еще доказывать, что физика гетеролазера принципиально отлична от физики его предшественника?

Но этого мало. Различие оптических свойств активной области и широкозонных эмиттеров приводит к возникновению волноводного эффекта, наподобие того, как это имеет место в волоконно-оптических линиях связи, излучение локализуется строго в активной зоне и, кроме того, возникает селекция мод, дополняющая действие резонатора (зеркальных торцов кристалла). Кроме того, широкозонные области ("окна") позволяют, в случае необходимости, выводить через них излучение без потерь. Наконец, технология гетероструктур открыла перед лазерами возможность создания малоразмерных структур типа квантовых нитей и квантовых точек, и использования, тем самым, квантоворазмерных эффектов. Это обнаружилось уже в процессе усовершенствования гетеролазеров и носит принципиальный характер: через новую технологию к новой физике.

Приоритетной датой создания гетеролазера следует считать 30 декабря 1968 года. Именно тогда в редакцию журнала "Физика и техника полупроводников" поступила статья [24], сообщившая о создании полупроводникового лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре и имеющего плотность порогового тока $J_{пор} = 4,3 \cdot 10^3$ А/см², т.е. на порядок меньше того, что у лучших "обычных" лазеров ($\sim 3(10^4 \dots 10^5)$ А/см²). Еще через два года величина $J_{пор}$ опустилась ниже 10^3 А/см², а общий КПД достиг 25%, потом появились сообщения о превышении срока службы в 10 тыс. ч, затем и 100 тыс. ч стало мало (а это 12 лет), наконец, во второй половине 1980-х годов достигли $J_{пор} = 40$ А/см². Словом, пошло-поехало.

Гетеролазер стал единственным среди всех других разновидностей лазеров, который пошел в массовое производство и получил широчайшее применение в информатике

* В рассказах об этой счастливой случайности говорится, как Алферов исключил из рассмотрения соединения, содержащие алюминий, из-за склонности этого элемента к коррозии, как случайно где-то обнаружили завалившийся кусочек соединения GaAlAs, вполне сохранившийся, как поняли, что в составе соединения алюминий ведет себя вполне сносно, иначе, чем на свободе... Рассказ растиражирован и уже стал легендой из числа тех, которые непременно сопутствуют большим открытиям.

и телекоммуникации (IT-технологии). Только благодаря гетеролазеру стали возможны волоконно-оптическая связь и оптические дисковые накопители, будущее обещает создание эффективных осветительных систем и сверхпроизводительных вычислителей.

ЛАЗЕР В КОНТЕКСТЕ ИСТОРИИ

Приведем некоторые общие соображения, навеянные изучением истории электроники в рассматриваемый период.

1. Три электронных прибора – транзистор, лазер, микросхема – стали символами самого замечательного и значимого четвертьвекового периода истории электроники (1947–1971 гг.), который уместно назвать эпохой "бури и натиска".

2. В этот период состоялись все *определяющие открытия в физике и достижения в технологии*, благодаря которым родились и встали на ноги: транзистор (от точечного, 1947 г., до МОП-транзистора, 1960 г.); лазер (от мазера, 1954 г., до гетеролазера, 1968 г.); микросхема (от макета, 1958 г., до микропроцессора, 1971 г.); специфическая инфраструктура (материаловедение, спецмашиностроение, аналитика, метрология); принципиально новое массовое производство, отличное от всех иных производств. Общий итог: *создан физико-технологический и приборный базис* электроники (и IT-технологии), определяющий главные векторы прогресса на ближайшие 100 лет или более.

3. Среди всех разновидностей лазеров безусловным премьером является *гетеролазер*; это предопределяют следующие его принципиальные отличия:

- наивысшее совершенство физики, устройства, технологии, обеспечивающее достижение предельной эффективности (КПД, быстродействие, полная совместимость с микроэлектроникой, долговечность);
- массовость производства и применения, вызывающие *цивилизационные* изменения – формирование информационного общества;
- заложенная возможность постоянного совершенствования.

4. История лазера (транзистора, микросхемы) подводит нас к мысли, что только следуя по пути его развития, можно приблизиться к *решению проблемы гуманизации техники* – главной (и почти единственной) проблемы философии техники. Суть ее в том, чтобы ослабить вредное, деструктивное влияние техники на природу, человека, сохраняя ее позитивные достижения. Очевидно, что единственный путь к этому – безотходная технология

создания артефактов, порождающих лишь пользу, но не вред, т.е. в случае лазера имеющих КПД, стремящийся к 100%.

Характерно, что при вручении престижной японской премии Киото за гетеролазер Ж.И.Алферову, И.Хаяши и М.Панишу было сказано, что их достижение сохранило "баланс между наукой и духовной сферой и будет способствовать формированию новой философской парадигмы". Похоже, что проблема гуманизации техники от гуманитариев, которые ее сформулировали и признали неразрешимой, переходит в руки ученых и техников – созидателей и оптимистов.

5. История лазера интересна тем, что по времени она совпала с периодом самого напряженного противостояния двух великих держав в холодной войне, и несмотря на это (и благодаря этому) ученые двух стран решили важнейшую научно-техническую проблему сообща, ибо наука по природе своей интернациональна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как это было... – М.: Лазерная ассоциация, 2006–2012, т.1–4.
2. **Gordon J.P., Zeiger H.J., Towns C.H.** Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH₃. – Physical Review, July 1954, Volume 95, Issue 1, p.282–284.
3. **Gordon J.P., Zeiger H.J., Towns C.H.** The Maser–New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer. – Physical Review, August 1954, v.99, Issue 4, p.1264–1274.
4. **Басов Н.Г., Прохоров А.М.** Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул. – ЖЭТФ, 1954, т.27, вып.4 (10), с.431–438.
5. **Басов Н.Г., Прохоров А.М.** О возможных методах получения активных молекул для молекулярного генератора. – ЖЭТФ, 1955, т.28, вып.2, с.249–250.
6. **M.Bloembergen.** Proposal for a New Type Solid State Maser. – Physical Review, October 1956, v.104, Issue 2, p.324–327.
7. **Schawlow A.L., Townes C.H.** Infrared and Optical Masers. – Physical Review, December 1958, v.112, Issue 6, p.1940–1949.
8. **Прохоров А.М.** О молекулярном усилителе и генераторе на субмиллиметровых волнах. – ЖЭТФ, 1958, т.34, вып.6, с.1658–1659.
9. **Maiman T.H.** Stimulated optical radiation in ruby. – Nature, 1960, v.187, p.493–494.
10. **Maiman T.H.** Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby. – Physical Review Letters, 1 June 1960, v.4, Issue 11, p.564–566.

11. **Javan A., Bennet W.R., Herriott D.R.** Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. – Physical Review Letters, 1 February 1961, v.6, Issue 3, p.106-110.
12. **Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М.** Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем. – Успехи физических наук, октябрь 1960, т. LXXII, вып.2, с.161-209.
13. **Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М.** Получение состояний с отрицательной температурой в р-п переходах вырожденных полупроводников. – ЖЭТФ, 1961, т.40, вып.6, с.1879-1880.
14. **M. Bernard, G. Duraffourg.** Laser Conditions in Semiconductors. – Physica Status. Solidi, 1961, v.1, p.699-703.
15. **Наследов Д.Н., Рогачев А.А., Рывкин С.М., Царенков Б.В.** Рекомбинационное излучение арсенида галлия. – ФТТ, 1962, т.4, с.1062-1065.
16. **R.N.Hall, G.E.Fenner, J.D.Kingsley, T.J.Soltys, R.O.Carlson.** Coherent Light Emission From GaAs Junctions. – Physical Review Letters, 1 November 1962, v.9, Issue 9, p.366-368.
17. **M.I.Nathan, W.P.Dumke, G.Burns, F.H.Dill, Jr., and G.Lasher.** Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. – Applied Physics Letters, 1962, №1, v.1, Nov.1, Issue 3, p.62-64.
18. **N.Holonyak, Jr. and S. F. Bevacqua.** Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions. – Applied Physics Letters, 1962, v.1, Dec.1, Issue 4, p.82-83.
19. **T.M.Quist, R.H.Rediker, R.J.Keyes, W.E.Krag, B.Lax, A.L.McWhorter, and H.J.Zeiger.** Semiconductor maser of GaAs. – Applied Physics Letters, 1962, v.1, Dec.1, Issue 4, p.91-92.
20. **Багаев В.С., Басов Н.Г., Вул Б.М., Копыловский Б.Д., Крохин О.Н. Маркин Е.П., Попов Ю.М., Хвощев А.И., Шотов А.П.** – ДАН СССР, 1963, т.150, №2, с.275-278.
21. **Алферов Ж.И.** Физика и жизнь. – СПб.: Наука, 2000.
22. А.С. 181737 (СССР). Полупроводниковый лазер с электрической накачкой. / Алферов Ж.И., Казаринов Р.Ф. – Б.И., 1975, №14, с.147. Испр. 30.03.63. – Там же, 1985, №40, с.269.
23. **H.A.Kroemer.** Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers. – Proceedings of the IEEE, 1963, v.51, p.1782-1783.
24. **Алферов Ж.И., Андреев В.М., Портной Е.Л., Трукан М.К.** Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре. – ФТП, 1969, т.3, с.1328-1332.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена: 1188 р.

ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Куэй Р.

Представленный в книге аналитический обзор охватывает свыше 1750 работ, посвященных III-N полупроводникам, которые применяются для создания транзисторов и радиоэлектронных устройств большой мощности, работающих в СВЧ-диапазоне частот.

Рассмотрены материалы, приборы, их технология, моделирование, проблемы надежности и применения.

Книга представляет большой интерес для студентов, аспирантов, инженеров, разработчиков приборов и соответствующей аппаратуры.

МОСКВА: ТЕХНОСФЕРА,
2011. – 592 с.
ISBN 978-5-94836-296-0

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319 Москва, а/я 91; ☎ (495) 956-3346, 234-0110; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru