

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА: КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ СТАНОВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВООБРАЗУЮЩЕЙ ФИЗИКО–ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Приведено короткий огляд основних досягнень людства в області генерування, передачі, прийому та посилення високочастотних електромагнітних коливань у мікрометровому – метровому діапазоні довжин хвиль, що відносяться до такої передової галузі науки і техніки як радіоелектроніка.

Приведен краткий обзор основных достижений человечества в области генерирования, передачи, приема и усиления высокочастотных электромагнитных колебаний в микрометровом – метровом диапазонах длин волн, относящихся к такой передовой отрасли науки и техники как радиоэлектроника.

Окончание. Начало №4, 5 2008 г.

8. СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Радиоэлектроника сыграла и продолжает играть сейчас свою важную роль в исследовании атомного ядра материи (любого вещества). В ядерной физике было сравнительно давно (в первой половине XX века) установлено, что для его (ядра) расщепления нужны быстрые "снаряды", размеры которых должны быть соизмеримы с размерами расщепляемых ядер. Известно, что для большинства ядер химических элементов их радиус $R_{\text{Я}}$ приблизительно определяется следующим соотношением [13]: $R_{\text{Я}} = R_0 \cdot A^{1/3}$, где A – массовое число ядра, равное сумме числа его элементарных частиц протонов Z и нейтронов N (например, для ядра природного урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ величина его массового числа оказывается точно равной: $A = Z + N = 92 + 146 = 238$), а $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ м. Тогда на основании приведенного выше эмпирического соотношения получаем, что для ядра урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ численное значение $R_{\text{Я}}$ составляет около $7,44 \cdot 10^{-15}$ м. Поэтому физики-ядерщики в своем выборе таких ядерных "снарядов" остановились, в основном, на отрицательно заряженных электронах (открыты в 1897 году английским физиком Дж. Томсоном), положительно заряженных протонах (открыты в 1886 году немецким физиком Е. Гольдштейном) и незаряженных нейтронах (открыты в 1932 году английским физиком Д. Чэдвиком) [6, 19]. Заметим, что природные ядерные "снаряды" в виде относительно тяжелых альфа-частиц (ядер атомов инертного газа гелия ${}^4_2\text{He}$), испускаемые при естественном распаде ядер такого радиоактивного элемента как радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ и имеющие при вылете из него скорость около 20 км/с, обладают энергией не достаточной для разрушения (расщепления) ядер многих химических элементов из периодической системы Д.И. Менделеева. Поэтому для осуществления многих ядерных реакций и исследований

требуются ускоренные до больших скоростей отрицательно заряженные электроны массой покоя $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг, положительно заряженные протоны массой $m_p = 1836 \cdot m_e$ и электрически нейтральные нейтроны массой $m_n = 1839 \cdot m_e$ [13, 19].

В истории развития ядерной физики, техники и энергетики роль ядерных "пушек", разгоняющих для проведения ядерных исследований элементарные частицы микромира (ядерные "снаряды") до требуемых скоростей (энергий), выполнили и выполняют поныне такие весьма сложные и дорогостоящие радиоэлектронные устройства высокого электрического напряжения как ускорители заряженных частиц (УЗЧ) [6, 13]. По физическому принципу своего действия УЗЧ напоминают гигантскую высоковольтную электровакуумную радиолампу, между электродами которой и происходит ускорение сильным электрическим полем тех или иных элементарных частиц.

Линейные ускорители электронов. В линейном ускорителе электронов (ЛУЭ) испускаемым за счет явления термоэлектронной эмиссии [15] раскаленным отрицательно заряженным катодом электронам нужную скорость в большом (в десятки м³) отвакуумированном объеме придает положительно заряженный анод [6]. Чем выше электрическое напряжение $U_{\text{АК}}$ между анодом и катодом в ЛУЭ, тем выше и скорость (энергия) ускоряемых в нем электронов. Ограничением уровня напряжения $U_{\text{АК}}$ здесь является электрическая прочность изоляционного промежутка между катодом и анодом ускоряющей трубы ЛУЭ. При определенном значении напряжения $U_{\text{АК}}$ между катодом и анодом ЛУЭ может произойти электрический пробой межэлектродного промежутка отвакуумированного объема, в котором возникает импульсная электрическая искра или непрерывная электрическая дуга. Поэтому повышать напряжение $U_{\text{АК}}$ в ЛУЭ с обычными двумя электродами можно лишь до известного предела. Выход из этой трудной электротехнической и высоковольтной задачи был найден благодаря созданию для ЛУЭ специальной ускоритель-

ной трубы, состоящей не из пары электродов как в радиодiode, а из ряда полых металлических цилиндров, расположенных на определенном расстоянии друг от друга вдоль одной продольной оси ЛУЭ. К этим цилиндрам-электродам подводится переменное напряжение $U_{MЭ}$, частота электрических колебаний которого строго согласовывается с длиной цилиндров (временем пролета электронов вдоль них) и расстоянием между цилиндрами (временем пролета электронов вдоль этих изоляционных промежутков).

Данный принцип построения УЗЧ был предложен и практически реализован в 1931 году известным американским физиком Э. Лоуренсом при создании мощного линейного ускорителя ионов [6]: здесь ионы (в частности, ядра атома водорода), проходя через ряд полых соосных металлических цилиндров увеличивающейся длины, ускорялись высоким высокочастотным напряжением так, что в вакуумных зазорах между цилиндрами ионы попадали в ускоряющую фазу. В этой связи для ЛУЭ, использующего этот принцип ускорения электронов, можно говорить о резонансе ускорения: последовательное ускорение электрическим полем пролетающих между цилиндрами электронов происходит в такт изменения напряжения $U_{MЭ}$. Поэтому при относительно больших продольных размерах ЛУЭ с помощью относительно небольших значений высокого электрического напряжения $U_{MЭ}$ в нем можно получать огромные значения кинетической энергии ускоренных электронов.

Отметим здесь то, что в соответствии с принятыми представлениями о волновой природе вещества [13, 19] для обнаружения с помощью электронов эффектов, связанных с конечными размерами ядра, для ускоренных в ЛУЭ электронов необходимо, чтобы длина волны электронов λ_e была меньше или порядка 10^{-15} м. Этой длине электронной волны λ_e удовлетворяют ультрарелятивистские электроны с энергией W_e , значительно большей, чем величина их энергии, найденная, исходя из знаменитой формулы Эйнштейна $m_{er}c^2 = 0,511$ МэВ, где $m_{er} = m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса релятивистского электрона, а $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Для указанной величины длины $\lambda_e = 10^{-15}$ м соответствующее ей значение энергии электрона может быть определено по известной квантовомеханической формуле [13]: $W_e = hc/\lambda_e = 1,24$ ГэВ, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка [17]. Рекордные значения энергии ультрарелятивистских электронов W_e в свое время были получены на стэнфордском ЛУЭ (США), которые составили около 20 ГэВ [13]. Таким огромным значениям энергии W_e ускоренных в ЛУЭ электронов соответствуют ультракороткие значения длин электронных волн, численно равные согласно приведенной выше формуле $\lambda_e = hc/W_e = 6,2 \cdot 10^{-17}$ м. Именно с помощью таких высокоэнергетичных ультрарелятивистских электронов с предельно короткими длинами λ_e их волн, значительно меньшими радиуса ядер $R_{Я}$ всех известных

нам химических элементов, и были выявлены новые механизмы внутриядерных взаимодействий нуклонов и других участвующих в этом микропроцессе элементарных частиц, а также открыты новые типы ядерных реакций и изучены новые микрочастицы.

Важной вехой в создании и научно-техническом использовании ЛУЭ в бывшем СССР и Украине остаются работы, выполненные ранее и проводимые сейчас в ННЦ "Харьковский физико-технический институт" (ХФТИ) НАНУ [6, 20]. Согласно [21, 22] мощные электронные пучки с энергией электронов W_e в диапазоне от 1 до 10 МэВ, создаваемые ЛУЭ, в настоящее время находят технологическое применение при: стерилизации медицинского инструмента, создании вакцин, очистке выбросных промышленных газов и пучково-озонной регенеративной очистке воды. Мощные генераторы ускоренных в вакууме сверхсильным электрическим полем релятивистских электронов с энергией до 10 МэВ (при импульсном токе электронного пучка до 1 МА и его длительности до 10 нс) сейчас используются в экспериментальной физике при осуществлении поисковых импульсных термоядерных реакций в рамках решения с их помощью энергетической термоядерной проблемы [23].

Линейные ускорители протонов. На рис. 9 показана принципиальная схема построения современного линейного ускорителя протонов (ЛУП) [2, 23]. В откачумированный предварительно цилиндрический объем заземленного металлического корпуса 2 ЛУП через вентиль 1 малыми порциями подается водород. На торцах этого объема внутри корпуса 2 размещены плоские конструкции анода 3 и катода 4, подсоединенные к источнику высокого постоянного напряжения (ИВПН) 5. В процессе ударной ионизации разряженного водорода внутри корпуса 2 от каждого его атома отделяется по одному электрону, которые устремляются под действием напряженности постоянного электрического поля $E_{AK} = U_{AK}/S_{AK}$, где U_{AK} , S_{AK} – соответственно напряжение и расстояние между анодом и катодом ЛУП, к положительно заряженному аноду 3. Образовавшиеся же при этом внутри корпуса 2 ЛУП положительно заряженные ядра водорода (протоны) устремляются к отрицательно заряженному катоду 4, имеющему центральное круговое отверстие, ведущее протоны в ускоряющую трубу с металлическим корпусом 6. За счет ИВПН 5 протоны, как правило, приобретают на первой стадии своего ускорения в корпусе 2 ЛУП кинетическую энергию W_p порядка 1 МэВ [2, 6]. Пролетев через тонкую входную металлическую диафрагму корпуса 6, протоны попадают в область действия сильных ускоряющих электрических полей, создаваемых в соответствии с указанным выше принципом ускорения заряженных частиц Э. Лоуренса между тонкими полыми соосными металлическими цилиндрами 7 (увеличивающейся вдоль ЛУП слева на право к выходу протонов из корпуса 6 длины) источниками высокого высокочастотного напряжения (ИВВН) 8.

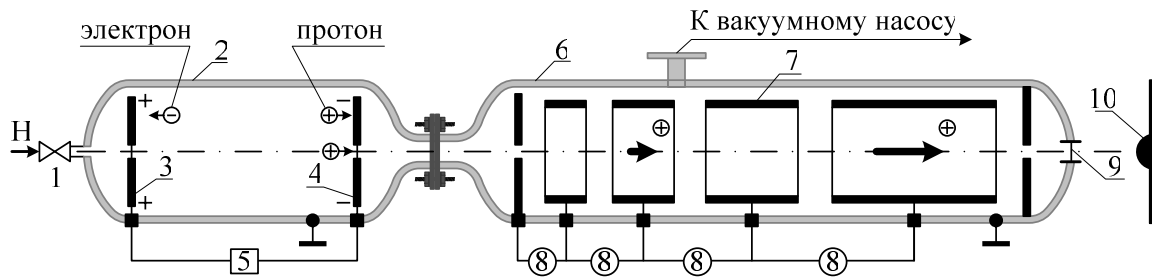


Рис. 9. Классическая упрощенная схема построения ЛУП

В результате резонансного ускорения протоны в приведенной на рис.9 схеме ЛУП на его выходе (у правого края корпуса 6) приобретают достаточно большую энергию W_p , достигающую численных значений порядка 30 МэВ [2, 6]. Пронизав на выходе ускорительной трубы по центру корпуса 6 тонкую металлическую диафрагму (фольгу) 9, закрывающую откакумированный объем трубы от внешней среды, ускоренные протоны направляются на ядерную мишень 10. Заметим, что при получении в ЛУП подобной рис. 9 конструкции протонов с выходной энергией $W_p=32$ МэВ его общая длина составляет около 20 м [2, 6]. Как видим, расположение в линейных УЗЧ ускоряющих электродов вдоль их продольной оси приводит к весьма большим геометрическим размерам, прежде всего, их ускорительной трубы, что можно отнести к определенным недостаткам такого типа УЗЧ. Укажем ниже некоторые известные данные из истории получения с помощью ЛУП и применения в ядерных исследованиях протонов высоких энергий.

В 1930-1932 годах в Кембриджском университете (Англия) известные английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон, применяя каскадный метод повышения электрического напряжения (для ИВПН 5 на рис.9) до уровня порядка 1 МВ, получили ускоренные протоны с энергией до 1 МэВ [6]. С помощью таких протонов ими в 1932 году было осуществлено расщепление ядра изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$ на два ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$ (на две α -частицы), разлетающиеся с энергией около 8,5 МэВ [6, 13]. Почему тогда ими была использована ядерная мишень 10 (см. рис. 9) из щелочноземельного металла лития? Объясняется это весьма просто: указанный изотоп лития ${}^7_3\text{Li}$ имеет малую энергию связи (5,57 МэВ/нуклон [6]), равную работе, которую необходимо затратить для расчленения его ядра на составляющие его нуклоны (объединенные элементарные частицы, состоящие из взаимно переходящих друг в друга протона и нейтрона [18]). Осуществленное Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном в 1932 году разрушение (расчленение) протонами высокой энергии ядра изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$ стало первой в мире ядерной реакцией, выполненной на УЗЧ [6, 13]. За данную работу они в 1951 году были удостоены Нобелевской премии по физике. Всего через несколько месяцев после указанных выше пионерских ядерных исследований в Англии уже в СССР с помощью созданного известными советскими физиками А.К. Вальтером и К.Д. Синельниковым в Украинском физико-техническом институте (УФТИ, ныне ННЦ "ХФТИ" НАНУ) самого мощного

по тем временам ЛУП в том же 1932 году было также осуществлено расщепление ядра изотопа лития ${}^7_3\text{Li}$ и других ядер искусственно ускоренными протонами с энергией в 2,5 МэВ [6, 23]. Здесь важно отметить то, что у истоков зарождения в Украине (в частности, в г. Харькове) ядерной физики стоял выдающийся советский физик-ядерщик и организатор науки И.В. Курчатов. Созданный тогда в УФТИ на основе электростатического генератора Ван де Граафа на номинальное напряжение 5 МВ Харьковский ЛУП имел следующие характеристики [6, 23]: диаметр металлических шаров ускорителя - 10 м; длину ускорительной трубы - 15 м; давление газа в ускорительной трубе $-4 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.

Циклические ускорители частиц. Важным научно-техническим событием для дальнейшего развития ядерной физики стало создание действующего циклического УЗЧ, названного *циклотроном* [6] (первая составная часть этого сложного термина происходит от греческого слова "kyklos" – "круг" [1]). Отметим, что сам принцип циклического ускорения заряженных микрочастиц был предложен упомянутым нами Э. Лоуренсом еще в 1930 году [6, 13]. В циклотроне движение ускоряемых электрическим полем заряженных частиц происходит в постоянном магнитном поле по разворачивающейся спирали. При этом вектор индукции "заворачивающего" магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости вращения микрочастицы, а частота ускоряющего электрического поля совпадает с частотой обращения микрочастицы в циклотроне. Таким путем в циклотроне обеспечивается соблюдение необходимого условия резонанса ускорения. Заметим, что циклотрон, предназначенный для ускорения электронов, получил название *микротрона* (первая составная часть этого сложного термина происходит от греческого слова "mikros" – "малый" [1]). В 1932 году под руководством Э. Лоуренса в США был построен первый циклотрон с диаметром полюсных наконечников электромагнита всего в 0,28м, который позволял ускорять протоны до энергии в 1,2 МэВ [6]. За изобретение циклотрона Э. Лоуренсу в 1939 году была присуждена Нобелевская премия по физике. В СССР первый пучок ускоренных на циклотроне Радиевского института (г. Ленинград) протонов был получен в 1937 году [6]. Созданию этого циклотрона много времени и сил отдал И.В. Курчатов, работавший тогда в ЛФТИ. Он прекрасно понимал необходимость создания технической базы отечественной ядерной физики. Вплоть до начала второй мировой войны он активно трудился над разработкой и созданием нового мощного циклотрона с диаметром полюсов электромагнита в 1,2 м, проектный срок ввода которого в эксплуатацию намечался на 1

января 1942 года [6].

По мере создания более мощных циклотронов и получения с их помощью протонов и других частиц более высоких энергий физики столкнулись с трудной задачей: при определенных скоростях ускоряемых частиц наступало рассогласование в работе циклотрона и микрочастицы начинали тормозиться. В результате для циклотрона наступал предел по достигаемой скорости и соответственно по энергии ускоряемых частиц. Физики-теоретики объяснили это явление возрастанием массы ускоряемой микрочастицы по мере приближения ее скорости к скорости света в вакууме. За счет возрастания массы частицы и происходило рассогласование процесса ее ускорения в циклотроне. Первым решил эту задачу советский физик В.И. Векслер в 1944 году. Год спустя аналогичное решение нашел американский физик Е.М. МакМиллан. Эти ученые разработали два способа компенсации увеличения массы ускоряемых в циклотроне частиц, движущихся с околосветовой скоростью [2, 6]: первый – постепенное изменение по мере ускорения частицы частоты ускоряющего электрического поля; второй – постепенное изменение в процессе ускорения частицы индукции магнитного поля (силы электромагнита). В настоящее время в УЗЧ циклотронного типа одновременно используются эти два способа повышения выходной энергии ускоряемых высоким напряжением $U_{МЭ}$ микрочастиц. В современных мощных циклотронах энергия ускоренных протонов W_p может достигать уровня до 1 ГэВ [1,13].

Дальнейшим развитием УЗЧ, использующих эффект резонансного ускорения микрочастиц, стали *синхротрон*, *фазотрон* и *синхрофазотрон*, а также ускорители, основанные на методе индукционного ускорения электронов (*бетатроны*) [13]. В последнее время новым типом УЗЧ являются ускорители на встречных пучках (*колайдеры*), в которых энергия сталкивающихся частиц практически вся переходит во внутреннюю энергию возбуждаемых ядер вещества и на рождение новых элементарных частиц [13, 17].

9. СОЗДАНИЕ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Развитие в мире техники сверхвысоких радиочастот, прежде всего, для решения задач радиолокации и успехи квантовой физики (например, создание в 1916 году великим физиком 20-го века А. Эйнштейном теории и дальнейшее открытие явления индуцированного излучения энергии атомами и молекулами) привели к созданию квантовой электроники, изучающей вынужденное излучение твердыми телами и газами сверхвысокочастотных электромагнитных волн под влиянием падающего на них извне излучения, а также электронные устройства (усилители и генераторы электромагнитных волн), действие которых основано на использовании вынужденного электромагнитного излучения [1, 13]. Индуцированное (вынужденное) излучение когерентно и находится в определенном фазовом соотношении с внешними усиливаемыми электромагнитными микроволнами. Для того чтобы система атомов (молекул) вещества излучала

больше энергии, чем поглощала, необходимо, чтобы число атомов (молекул) в возбужденном состоянии было больше числа этих «кирпичиков мироздания» в своем нижележащем энергетическом состоянии. Если это условие соблюдается, то говорят, что вещество обладает *инверсной заселенностью* и находится в неравновесном энергетическом состоянии. Поэтому одними из основных задач квантовой электроники стали поиск и разработка методов создания в твердых телах и газах неравновесных атомных систем с инверсной заселенностью, а также создание электронных устройств для усиления электромагнитных колебаний на основе индуцированного излучения.

Молекулярный квантовый генератор. Молекулярный генератор или усилитель (мазер) является усилителем микроволн, работающим на принципе вынужденного (индуцированного) излучения [13]. Название "*мазер*" происходит от английских слов "*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" – "*усиление микроволн при помощи индуцированного излучения*" [1, 13]. Главным конструктивным элементом мазера является резонатор с активным веществом, в котором при определенных условиях возникает индуцированное излучение. Резонатор имеет два ввода: один – для подачи энергии подкачки и создания инверсионной заселенности в молекулах активного вещества, а другой – для поступления усиливаемых и отвода усиленных высокочастотных электромагнитных волн. Для разделения во втором вводе электрических сигналов, проходящих в противоположных направлениях по одному волноводу и существенно отличающихся по высокочастотной мощности, применяются развязывающие циркуляторы [8]. В первом мазере, созданном в 1954 году советскими физиками Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым, инверсионная заселенность молекул активного вещества обеспечивалась с помощью неоднородного электростатического поля. В качестве рабочего вещества в мазерах используются аммиак NH_3 , водород, формальдегид и др. В первом советском мазере (генераторе стабильных сантиметровых электромагнитных волн с длиной волны $\lambda_M = 1,27$ см [6, 13]) использовались квантовые переходы между дискретными энергетическими уровнями в молекулах аммиака NH_3 . Молекулярные часы, построенные на основе такого мазера, имеют точность хода, равную 1с за 300 лет [13]. Мазеры, обладающие высокой монохроматичностью, когерентностью и узкой направленностью высокочастотного электромагнитного излучения, в настоящее время широко применяются в радиоастрономии, радиолокации, космической связи и эталонах частоты.

Оптический квантовый генератор. Оптический генератор (лазер) является усилителем сверхвысокочастотных электромагнитных волн в оптической области спектра. Название или термин "*лазер*" происходит от английских слов "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" – "*усиление света при помощи индуцированного излучения*" [1, 13]. Лазер, как и мазер, работает также по принципу вынужденного (индуцированного) излучения. Активными веществами в резонаторах лазера являются различные диэлек-

трические кристаллы, стекла, газы, полупроводники и плазма. В первом оптическом квантовом генераторе в качестве активного вещества был применен кристалл рубина (оксид алюминия, в кристаллической решетке которого некоторые атомы алюминия замещены ионами хрома Cr^{3+} [13]). Именно ионы хрома и являются в рубиновом лазере активными атомами, допускающими инверсионную заселенность. Рубиновый лазер усиливает и излучает красный свет с основной длиной волны $\lambda_L = 694,3$ нм [6, 13]. Инверсионная заселенность в рубиновом лазере достигается путем освещения кристалла рубина мощной вспышкой света. Как известно, такой процесс называют оптической накачкой. Вспышка света переводит атомы хрома в кристалле рубина (выполнен в виде цилиндра диаметром 1 см и длиной 10 см) из основного энергетического состояния в возбужденное. При управляемом переходе возбужденных атомов хрома в их основное состояние в активном веществе, размещенном в резонаторе, возникает индуцированное излучение. Резонатором в данном лазере являются два зеркала (разнесены на расстояние много больше длины волны излучения), одно из которых полупрозрачно (со стороны выхода усиленных волн). Импульсная мощность излучения рубинового лазера достигает 10^6 Вт с 1 см^2 торца цилиндра из нагреваемого кристаллического рубина (расходимость пучка излучения не превышает $0,5^\circ$; при температуре рубина в 1000°C такой лазер перестает работать). В лазерах на твердом теле в качестве активного вещества употребляется также неодимовое стекло, в котором активными атомами являются ионы неодима Nd^{3+} . Неодимовый лазер генерирует инфракрасное излучение с длиной волны $1,06$ мкм [13]. В газовом гелий-неоновом лазере в непрерывном режиме работы выходная мощность излучаемого им красного света с длиной волны $632,8$ нм составляет до 300 мВт. Лазер на углекислом газе CO_2 в непрерывном режиме генерирует инфракрасное излучение мощностью до 10 кВт, а аргоновый лазер – излучение в видимой области спектра мощностью до 1 кВт [13]. В импульсном режиме мощность указанных газовых лазеров достигает сотен киловатт. Лазеры нашли применение в промышленности (при сверлении отверстий в твердых материалах), научных исследованиях и медицине. Изобретение квантовых генераторов позволило создать усилители высокочастотных электромагнитных колебаний, выходные параметры которых в сотни раз превышают параметры (например, чувствительность) лучших радиоусилителей. В 1964 году основатели квантовой электроники Г.Н. Басов, А.М. Прохоров (СССР) и Ч. Таунс (США) были удостоены Нобелевской премии по физике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004. - 957с.
- [2] Плоский А.Ф. Как человек приручил волну.- М.: Сов. Россия, 1958.-224 с.
- [3] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля // *Электротехніка і електромеханіка*.-2005.- №1.- С. 5-7.
- [4] Баранов М.И. Генрих Рудольф Герц – первооткрыватель электромагнитных волн // *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №1.- С. 5-11.
- [5] Григорьян А.Т., Вяльцев А.Н. Генрих Герц. 1857-1894.- М.: Наука, 1968.- 309 с.
- [6] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.-312 с.
- [7] Попов А.С. Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний // *Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая*.-1896.- Т.28.-С. 1-14.
- [8] Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства.- М.: Сов. радио, 1973.- 368 с.
- [9] Баранов М.И. Оливер Хевисайд и его вклад в мировую сокровищницу науки // *Электротехніка і електромеханіка*.-2005.- №4.- С. 5-14.
- [10] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1.- Л.: Энергоиздат, 1981.- 536 с.
- [11] Финкельштейн М.И. Основы радиолокации.- М.: Сов. радио, 1973.- 496 с.
- [12] Жукова Л.Н. Лодыгин / Серия: Жизнь замечательных людей.- М.: Молодая гвардия, 1989.-304 с.
- [13] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.- 864 с.
- [14] Баранов М.И. Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов // *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №5.- С. 5-13.
- [15] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник.- Киев: Наукова думка, 1981.- 338 с.
- [16] Ваврин Д.М., Казанцев В.И., Канило П.М., Лебедюк И.Н. и др. Использование СВЧ-энергии для безмазутного розжига и стабилизации горения низкосортных углей// *Вестник МГТУ им. Баумана*.-2003.-№1.-С.87-97.
- [17] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.-624 с.
- [18] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики// *Электротехніка і електромеханіка*.-2007.- №2.- С.5-12; №3.- С. 5-11.
- [19] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира// *Электротехніка і електромеханіка*.-2006.- №4.- С. 5-15.
- [20] Onishchenko I.N. Progress in plasma wakefield acceleration driven by a short intense bunch of relativistic electrons// *Problems of Atomic Science and Technology*.-2006.-№6.-Series: Plasma Physics (12).- p. 158-162.
- [21] Adler R.J. Comparison of DC and pulsed beams for commercial applications// *10th International Conference on High Power Particle Beams*.-San Diego, USA (20-24 June 1994).-Vol. 1.- P. 29-32.
- [22] Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложкин Р.С. Контроль работоспособности изоляции линейного индукционного ускорителя, применяемого для промышленных целей// *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. Харків: НТУ "ХПІ".-2005.- №42.-С. 16-20.
- [23] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // *Электротехніка і електромеханіка*.-2007.- №5.- С. 48-60.

Поступила 21.11.2007