

Академик АН УССР В.П. ШЕСТОПАЛОВ

О НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ – ЛАЗЕРАХ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

1. В работе [1] указано, что генераторы дифракционного излучения (г.д.и.) представляют собой разновидность лазеров на свободных электронах (л.с.э.) (это отмечалось еще в [2]). В отличие от обычных лазеров, где источником когерентного излучения являются электроны, связанные с атомами (или молекулами) активного вещества, в л.с.э. ими стали электроны, которые извлекаются из эмиттирующих поверхностей и перемещаются в пространстве так, что их энергия движения превращается в когерентное излучение. Г.д.и. же можно считать л.с.э. в "чистом" виде, поскольку механизм генерирования колебаний в нем связан с дифракционным излучением, возникающим при равномерном и прямолинейном движении электронов вблизи, в частности, дифракционной решетки. Таким образом, когда речь идет о л.с.э., то в прямом смысле о таких лазерах можно говорить, имея в виду только г.д.и. (электроны в г.д.и.—л.с.э. естественным образом движутся свободно).

Как известно [2], автоколебания в г.д.и. осуществляются за счет положительной обратной связи, созданной высокочастотным открытым резонатором (о.р.). С помощью о.р., на одном из зеркал которого, частично его покрывая, расположена дифракционная решетка с движущимся вблизи нее электронным потоком, а на другом — отверстие для вывода излучения в свободное пространство, удастся вернуть дифракционное излучение на электронный поток и решетку. В результате за заданным типе колебаний происходит возбуждение о.р., концентрация в его объеме монохроматических электромагнитных волн, вывод энергии в нагрузку.

Г.д.и., являясь прибором О-типа, по некоторым своим характеристикам за счет наличия о.р. обладает также свойствами, которые аналогичны обычным лазерам [2].

2. Движущийся вблизи дифракционной решетки электронный поток, порождая дифракционное излучение, служит (прежде всего в г.д.и.) для генерации электромагнитных колебаний. В то же время электронный поток является обычным "нелинейным элементом", который определенным образом связан с резонансным контуром генератора — о.р. Весьма важно выяснить, какова роль этого "нелинейного элемента" при его взаимодействии с излученным электромагнитным полем. При этом необходимо указать не только на нелинейные процессы, связанные с обратным влиянием излучения на движение электронов вблизи дифракционной решетки (это важно для понимания самого процесса генерирования), но также обратить внимание на те явления, которые должны наблюдаться в том случае, если в одном и том же устройстве (г.д.и.) кроме чистой генерации требуется получить еще и усиление, и смешение колебаний, и выделение полезного сигнала. Такой подход к нелинейным процессам в г.д.и. вполне правомочен, если считать, что электронный поток в г.д.и.—л.с.э. действительно представляет собой "нелинейный элемент", обладающий определенными "активными" и "пассивными" свойствами.

3. Для простоты дальнейших рассуждений рассмотрим следующую схему г.д.и.—л.с.э. Пусть над безграничной периодической отражательной двухмерной дифракционной решеткой (период l), выполненной из идеально проводящих брусьев в прямоугольного сечения (высота брусьев h , их ширина $l-d$), движется равномер-

но и прямолинейно с одной из скоростей V_n плоский бесконечно тонкий неограниченный монохроматический электронный поток. Тогда при условии

$$(1) \quad \frac{\kappa_n}{|n| + \kappa_n} \leq \beta_n \leq \frac{\kappa_n}{|n| - \kappa_n}, \quad n = -1, -2, -3, \dots,$$

($\beta_n = v_n/c$, c – скорость света в вакууме; $\kappa_n = l/\lambda_n$) с длиной волны

$$(2) \quad \lambda_n = -\frac{1}{n} \left(\frac{1}{\beta_n} - \cos \psi_n \right)$$

под углом к плоскости решетки

$$(3) \quad \psi_n = \arccos \frac{\kappa_n + n\beta_n}{\beta_n \kappa_n}$$

возникает дифракционное излучение, распространяющееся в виде однородной плоской волны. Этот процесс возможен в случае, если:

а) монохроматический электронный поток с длиной волны модуляции λ_n (1) создан искусственным способом (например, воздействием на эмиттирующую поверхность двумя лазерными лучами, длина волны биений которых составляет $\lambda_n(1)$);

б) возникшее дифракционное излучение возвращается обратно на поток и решетку и в результате взаимодействия его с потоком модулирует поток с длиной волны модуляции λ_n (1) (эта ситуация создается при расположении на некотором расстоянии от потока и решетки отражающей безграничной плоскости [2]).

Последний случай и представляет собой упрощенную схему автогенератора г.д.и. – л.с.э. Дальнейший анализ проведем для случая б), считая, что случаем а) является идеализированный простейший генератор монохроматических колебаний, принцип действия которого довольно детально изучен [2].

4. Предположим, что в случае б) плоскость, расположенная параллельно решетке и электронному потоку, частично пропускает в свободное пространство дифракционное излучение. Если вдали от этой структуры (решетка + поток + дифракционное излучение) находится материальный объект, то отраженные от него электромагнитные волны, проникая через полупрозрачную плоскость, которая совместно с решеткой образует резонансную структуру (при ограниченных размерах решетки и полупрозрачной плоскости это о.р. типа Фабри – Перро), взаимодействуют с "нелинейным элементом" – электронным потоком. Отраженная от объекта объемная волна может быть усилена. Усиление происходит за счет взаимодействия этой объемной волны с электромагнитными волнами, возбужденными в о.р. электронным потоком. Возможно два варианта такого усиления:

1) объемная волна преобразуется на структуре решетки + электронный поток в поверхностную волну с разовой скоростью v_ϕ и при выполнении условия синхронизма с поверхностной волной электронного потока v_e исходная объемная волна усиливается (в какой-то степени это ЛБВ-усиление; однако необходимо помнить, что в ЛБВ-усилителе поверхностное поле усиливаемого сигнала взаимодействует с поверхностным же полем электродинамической структуры – спираль, "грбенка" и т.д.);

2) объемная волна преобразуется на решетке + электронный поток в объемное поле дифракционного излучения и в результате многократного переотражения между зеркалами о.р., отбирая энергию движения электронов (с выполнением условий для поддержания дифракционного излучения (1)–(3)), усиливает исходную объемную волну (аналогичный механизм усиления в классической вакуумной электронике отсутствует).

5. В рассматриваемой модели (случай б)) электронный поток может вести себя и как "пассивный" нелинейный элемент (подобно кристаллу полупроводника

или ДБШ). Действительно, прошедшая через частично прозрачную плоскость объемная волна на электронном потоке — "пассивном нелинейном элементе" — смешивается с объемной волной дифракционного излучения. В результате два сигнала перемножаются. Процесс перемножения — типичное нелинейное явление, характерное для устройств типа г.д.и. — л.с.э. Важно, что в смешиваемых электромагнитных полях можно выделить огибающую перемноженных сигналов и с помощью приемного устройства, расположенного непосредственно в объеме г.д.и., произвести анализ огибающей и, в частности, определить некоторые свойства, которые характерны для рассеивающего объекта, находящегося вне г.д.и.

6. Существенным является тот факт, что рассматриваемые здесь нелинейные процессы протекают в условиях, когда "нелинейный элемент" — равномерно и прямолинейно движущийся вблизи дифракционной решетки электронный поток — помещен в высокочастотную открытую электродинамическую структуру. Это приводит к тому, что все нелинейные процессы, возникающие в г.д.и. — л.с.э., протекая последовательно (генерация, усиление, смешение), порождают такие электромагнитные поля, которые обладают высокой когерентностью, качественным фурье-спектром и стабильностью колебаний, малыми шумами и побочными излучениями, высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Указанные качества электромагнитных полей г.д.и. — л.с.э. особенно полезны при использовании их в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук УССР, Харьков

Поступило
11 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leavitt R.P., Wortman D.E., Morrison C.A.* — *Appl.Phys.Lett.*, 1979, vol. 35(5), p. 1.
2. *Шестопапов В.П.* Дифракционная электроника. Харьков: Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1976.