

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Лампа с бегущей волной (история в лицах и судьбах)

Д.И. Трубецков, Г.М. Вдовина

Исследование процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями и устройств на их основе было и остаётся одним из центральных направлений науки о колебаниях и волнах. В XX веке в журнале УФН были опубликованы обзоры, посвящённые теории и описанию новых на то время приборов. Прошли годы, изменившие теорию и конструкции этих приборов, а также их место в диапазоне электромагнитных волн. Появилась релятивистская электроника. Идёт освоение терагерцового диапазона. За минувшие годы стали известны некоторые новые факты, связанные с историей создания лампы бегущей волны (ЛБВ), освещённые в настоящей статье. Изложены факты творческого пути Андрея Гаева, Рудольфа Компфнера и Джона Пирса. Помимо истории ЛБВ в лицах и судьбах представлены результаты некоторых современных исследований и разработок ЛБВ для различных целей.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, Гаев, Компфнер, Пирс, история

PACS numbers: 01.65.+g, 84.40.Fe

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.12.038707>

Содержание

1. Введение: от прошлого к настоящему (543).
 2. Краткая история, к которой все привыкли (548).
 3. Андрей Гаев: от сёрфинга к спутниковой лампе с бегущей волной (550).
 4. Рудольф Компфнер: "...так и быть, — пусть поле движется вместе с электронами" (551).
 5. Джон Робинсон Пирс — "...один из великих инженеров-провидцев" (554).
 6. Заключение (554).
- Список литературы (555).

Что касается новизны, то нет такого человека, который, глубоко познакомясь с наукой и наблюдая мир, не проникся бы твёрдой мыслью: "Нет ничего нового на Земле".
Фрэнсис Бэкон

1. Введение: от прошлого к настоящему

В 1948 г. в журнале УФН была опубликована статья В.М. Лопухина [1], которая начиналась со слов: "В по-

следнее время в литературе появились сведения о новом усилителе микроволн. Эксперименты показали, что этот вид усилителя имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими усилителями микроволн, применявшимися до сих пор. Действие нового усилителя основано на остроумном использовании взаимодействия электронного пучка с бегущей электромагнитной волной". В упомянутой статье описано устройство лампы с бегущей волной (ЛБВ), изложены основные принципы усиления и краткая аналитическая теория (по сути, выведены уравнения для переменных составляющих тока, электрического поля, качественно проанализировано решение дисперсионного уравнения). Приведены и рабочие характеристики лампы, известные на тот момент: коэффициент усиления по мощности 200, ширина полосы пропускания на несущей частоте усиливаемого сигнала в 3600 МГц (длина волны $\lambda \approx 10$ см) около 800 МГц [2].

Напомним кратко, в чём состоит "остроумное использование взаимодействия электронного пучка с бегущей электромагнитной волной", начав с элементарного описания пространственного резонанса (см., например, [3, 4]).

Пусть в одномерной среде вдоль направления x распространяется бегущая волна $U(x, t)$ с постоянной скоростью v_{ph} (t — время). Тогда её распространение можно описать уравнением

$$\frac{\partial U}{\partial t} + v_{ph} \frac{\partial U}{\partial x} = 0.$$

Если на среду, в которой распространяется волна, оказывается распределённое внешнее воздействие $G(x, t) = G(x) \exp(j\omega t)$ (ω — круговая частота, $j = \sqrt{-1}$), то при $U(x, t) = U(x) \exp(j\omega t)$ имеем

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} + j \frac{\omega}{v_{ph}} U(x) = G(x). \tag{1}$$

Д.И. Трубецков^{(1,2,*), Г.М. Вдовина^(1,3,**)}

⁽¹⁾ Саратовский национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация

⁽²⁾ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",

Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Научно-производственное предприятие "Алмаз", ул. Панфилова 1, 410033 Саратов, Российская Федерация

E-mail: ^(*)dtrubetskov@yahoo.com, ^(**)vdovinagm@gmail.com

Статья поступила 6 марта 2019 г., после доработки 30 октября 2019 г.

При условии $U(0) = 0$ уравнение (1) удобно переписать в интегральной форме

$$U(x) = \exp\left(-\frac{j\omega x}{v_{ph}}\right) \int_0^x G(\xi) \exp\left(\frac{j\omega \xi}{v_{ph}}\right) d\xi, \quad (2)$$

где ξ — текущая переменная интегрирования.

Считая далее, что внешнее воздействие — волна постоянной амплитуды с частотой ω и фазовой скоростью v_{ext} , т.е. полагая $G(x, t) = G(x) \exp(j\omega t - j\omega x/v_{ext})$, и интегрируя (2), находим:

$$U(x, t) = G(0) \exp\left(j\left(\omega t - \frac{\omega x}{v_{ph}}\right)\right) \times \frac{\exp\left(j(\omega x/v_{ph} - \omega x/v_{ext})\right) - 1}{j(\omega/v_{ph} - \omega/v_{ext})}. \quad (3)$$

При условии $\omega/v_{ph} \approx \omega/v_{ext}$ ($v_{ph} \approx v_{ext}$) получаем секулярный рост вдоль координаты x , т.е.

$$U(x, t) = G(0)x \exp\left(j\left(\omega t - \frac{\omega x}{v_{ph}}\right)\right). \quad (4)$$

Главный вывод из элементарного анализа: для нарастания гармонической волны в пространстве под действием внешней волны необходимо совпадение их волновых чисел — резонанс волновых чисел, т.е. имеет место пространственный резонанс. Конечно, есть резонанс и частот, и волновых чисел, поскольку частота ω одна, а $v_{ph} \approx v_{ext}$. Последнее равенство обычно называют условием синхронизма. Осознание сформулированных условий и позволило создать в своё время ЛБВ.

Предположим далее, что $U(x, t)$ — продольная составляющая напряжённости электрического поля E волны в волноведущей системе, а $G(x, t)$ — волна переменного тока I в электронном потоке (с точностью до размерного постоянного коэффициента). В этом случае уравнение (1) есть дифференциальное уравнение возбуждения волновода заданным током (см., например, [4, 5]):

$$\frac{dE}{dx} + j \frac{\omega}{v_{ph}} E = -\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{v_{ph}}\right)^2 KI(x), \quad (5)$$

где K имеет размерность сопротивления и называется сопротивлением связи. Если прямолинейный электронный поток с малой плотностью тока представить как поток невзаимодействующих частиц, движущихся со скоростью v_0 , то высокочастотные возмущения имеют вид волны тока

$$I(x, t) = I(0) \exp\left(j\left(\omega t - \frac{\omega x}{v_0}\right)\right)$$

с фазовой скоростью v_0 ($v_0 = v_{ext}$). Следовательно, простейшее условие синхронизма — равенство скорости электронов потока и фазовой скорости волны. При нерелятивистских скоростях электронов для выполнения условия синхронизма электромагнитная волна должна быть замедлена. Было придумано колоссальное количество замедляющих систем, но "выжили" немногие: в первую очередь спираль в широкополосных ЛБВ, цепочка связанных резонаторов в мощных ЛБВ и петляющий волновод в коротковолновых усилителях. По мере изложения истории ЛБВ мы вернёмся к замедляющим системам.

Подчеркнём, что в нашем напоминании рассматривалось лишь влияние внешней волны на собственную. Это практически всегда не так: при условии синхронизма задача самосогласованная, поскольку поле изменяет ток. В ЛБВ, например, поле волноведущей (замедляющей) системы модулирует пучок по скорости и группирует электроны в сгустки. Каковы же особенности группирования электронов в бегущей волне и их взаимодействия с ней? Качественное объяснение есть уже в статье [1] и в учебниках. Но вряд ли читатель будет искать журнал прошлых лет или листать учебник. Поэтому позволим себе ещё одно напоминание.

Наиболее удачно процесс взаимодействия электронов и электромагнитной волны можно проиллюстрировать на примере известной механической модели [5], в которой шарики под действием гравитационных сил перемещаются по некоторой поверхности (рис. 1). Шарики в данном случае являются аналогом электронов, а профиль поверхности соответствует продольному распределению потенциала электромагнитного поля в данный момент времени. Причём в системе координат, связанной с "холодной" волной, вершины и впадины потенциальной поверхности неподвижны.

Предположим, что скорость волны v_{ph} в линии без пучка совпадает с невозмущённой скоростью электронов v_0 . Первоначально энергообмен между электронами и волной мал; аналогией этому в механической модели послужит одинаковая высота вершин и впадин рассматриваемого профиля. Под действием гравитационных сил электроны-шарики скатываются в центр впадин, т.е. электроны будут группироваться вблизи нулевой фазы напряжённости электрического поля. В итоге сгруппированный ток пучка будет опережать поле "холодной" волны на $\pi/2$ (говорят, что взаимодействие носит реактивный характер). В результате подобного взаимодействия скорость "горячей" волны v_h уменьшится. Тогда шарики сместятся со дна впадины на правый тормозящий склон потенциальной поверхности (продольная составляющая поля волны здесь уже отлична от нуля). Энергообмен в этом случае приводит к нарастанию амплитуды (в механической модели высота горбов и глубина впадин увеличиваются).

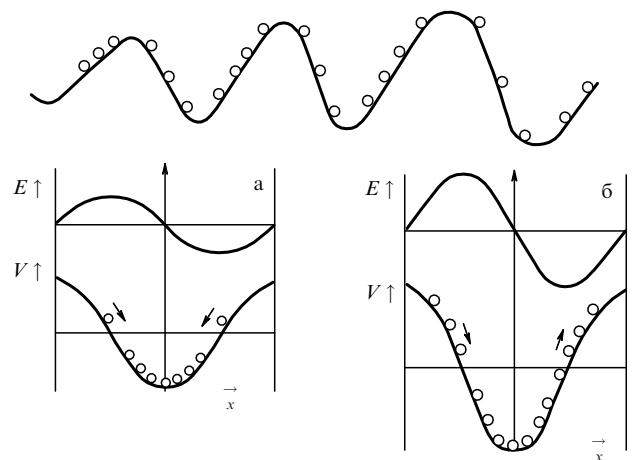


Рис. 1. Рисунок, поясняющий процессы группирования электронов в бегущей волне и взаимодействия с ней в рамках механической модели [4]: (а) в начале пространства взаимодействия $v_0 = v_{ph} = v_h$, (б) в конце пространства взаимодействия $v_0 > v_h$.

Если предположить, что скорость электронов изначально немного больше фазовой скорости волны и волна нарастающая, то электроны-шарики будут встречать по мере движения по поверхности то подъёмы, то спады. Поэтому шарики группируются на тормозящих участках ("правый" склон), образуя сгустки в данной фазе, и разгруппировываются на ускоряющих ("левый" склон). В силу того что волна нарастающая, эффекты торможения преобладают над эффектами ускорения. Причём если электроны-шарики пройдут весь тормозящий склон, то взаимодействие будет наиболее эффективным. В результате постоянного отбора малых порций энергии у электронного потока по всей длине лампы происходит усиление электромагнитной волны.

В том случае, если первоначально скорость электронов меньше фазовой скорости волны и электроны "отстают" от неё, шарики-электроны преимущественно будут группироваться на ускоряющих склонах поверхности, что отвечает передаче энергии от волны к электронному потоку. Тогда возможно затухание электромагнитной волны в линии или даже полное подавление входного сигнала, о чём будет рассказано в дальнейшем в разделе 4.

Известно, что электрон, который движется прямолинейно и равномерно в пустоте, не излучает. Когда же он движется в прозрачной среде со скоростью, превышающей фазовую скорость электромагнитной волны $v_{ph} = c/n$, где c — скорость света в пустоте, n — показатель преломления среды, то возможно черенковское излучение (излучение Вавилова – Черенкова). В этом случае от оси, совпадающей с направлением движения электрона, расходится коническая волна, составляющая с осью угол θ , определяемый известной формулой $\cos \theta = v_{ph}/v_0$. Отдельные электроны со случайными фазами излучают некогерентно, что соответствует спонтанному излучению. Когерентное излучение может наблюдаться, когда фазы полей, излучаемых разными электронами, согласованы. Последнее возможно при соответствующем группировании электронов в сгустки.

Излучение возможно и когда электрон пролетает в пустоте вблизи периодической структуры, имеющей в направлении движения частицы период l . Тогда возбуждается набор пространственных гармоник с волновыми числами $k_n = \omega/v_0 + 2\pi n/l$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). В окружающем пространстве формируется волна, фазовая скорость которой (или фазовая скорость одной из пространственных гармоник вдоль направления движения электронов) в точности равна v_0 . Однако группирование нет: волна уходит, не оказывая обратного влияния на поток электронов. Если волну удержать в системе (например, поток движется внутри спирали), то она группирует электронный поток. Именно такая продольная группировка происходит в ЛБВ, поэтому имеет место индуцированное черенковское излучение.

Заметим, что в работах Л.А. Вайнштейна [6–8] подробно изложена теория спонтанного и индуцированного излучения свободных электронов применительно к резонансным автогенераторам. В этих работах подчёркивается, что классическая теория для таких устройств даёт индуцированное излучение в приближении заданного поля, а спонтанное — в приближении заданного тока.

Закончим краткое обсуждение спонтанного и индуцированного излучения свободных электронов цитатой из книги [9]:

"Читателю, воспитанному в духе традиционного подхода к электронике сверхвысоких частот, рассмотрение спонтанного и индуцированного излучений, вероятно, покажется искусственным и лишним. Действительно, спонтанное и индуцированное излучения — это основные понятия квантовой теории излучения, без которых нельзя обойтись при изложении квантовой электроники; в классической же электронике, оперирующей с движением электронов в вакууме, до сравнительно недавнего времени такая трактовка фактически не применялась, поскольку содержательных и новых результатов она не давала. Ситуация изменилась с появлением приборов с криволинейными пучками, теорию которых можно развивать двояким путём — в духе классической электроники, рассматривая движение электронов... и в духе квантовой электроники, рассматривая электронный пучок как активную среду, состоящую из нелинейных осцилляторов... последний подход оказывается плодотворным и вместе с тем физически наглядным".

Интересно отметить, что изучение принципа синхронизма и эффекта группировки электронов — процессов, характерных для ЛБВ, — в значительной степени повлияло и на развитие теории мазеров на циклотронном резонансе и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Однако, с другой стороны, исследование процессов, происходящих в упомянутых устройствах, позволило понять, что с точки зрения квантовой физики в ЛБВ также используются механизмы индуцированного излучения, как в мазерах и лазерах.

Заметим, что в настоящее время электронная промышленность занимается главным образом разработкой и изготовлением именно ЛБВ относительно малой мощности. Однако одним из направлений фундаментальных исследований по-прежнему остаётся изучение устройств, в которых используются сильноточные релятивистские электронные пучки. Они подходят для генерации и усиления импульсного излучения гигаваттного уровня мощности. Считается, что ещё в конце 1940-х годов появились предпосылки для развития релятивистской сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники [10]. В первую очередь её зарождение связывают с теоретическими работами В.Л. Гинзбурга [11, 12]. Первые экспериментальные попытки создать релятивистские источники в микроволновом диапазоне на основе обычных ускорителей не были успешными [13]. В действительности отбор энергии у релятивистских электронов возможен в том случае, если имеется достаточно большое высокочастотное (ВЧ) поле в достаточно большой области пространства. "...Только с появлением сильноточных ускорителей релятивистская СВЧ-электроника получила возможность стать на реальную почву" [10]. В работе [10] М.И. Петелин привёл сопоставительный анализ законов подобия слаборелятивистских и ультрарелятивистских СВЧ-приборов с целью выявить, повлечёт ли за собой переход к интенсивным пучкам релятивистских электронов качественные изменения конструктивных особенностей СВЧ-устройств.

В слаборелятивистском случае была получена система уравнений, описывающая движение электронов:

$$\begin{cases} \frac{d\mu}{d\zeta} = \operatorname{Re} [G(\zeta) \exp(jv)], \\ \frac{dv}{d\zeta} = \frac{1}{\sqrt{\mu}} - 1, \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu = v^2/v_0^2$ — безразмерная кинетическая энергия, v_0 — скорость электрона на входе в прибор, $G = -2eE_{\parallel}^{\omega}/(\omega m_0 v_0) \exp(j\zeta)$, $\zeta = z\omega/v_0$ — безразмерная продольная координата, E_{\parallel}^{ω} — комплексная амплитуда продольной составляющей переменного электрического поля на частоте ω , e и m_0 — заряд и масса электрона.

Для ультрарелятивистского электронного потока справедлива система уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\mu}{d\zeta} = \text{Re}[G(\zeta) \exp(jv)], \\ \frac{dv}{d\zeta} = \frac{1}{\mu^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где в качестве $\mu = \varepsilon/\varepsilon_0$ взята безразмерная полная энергия, ε_0 — полная энергия электрона на входе в прибор,

$$G = -2\gamma_0 \left(\frac{e\dot{\lambda} E_{\parallel}^{\omega}}{\varepsilon_{\text{rest}}} \right) \exp\left(\frac{jz}{\dot{\lambda}}\right), \quad \zeta = \frac{z}{\dot{\lambda}} \frac{1}{2\gamma_0^2},$$

$$\dot{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{\omega}, \quad \gamma_0 = \frac{\varepsilon_0}{m_0 c^2},$$

$\varepsilon_{\text{rest}} = m_0 c^2$ — энергия покоя.

Из сопоставления результатов было установлено, что, например, для сохранения неизменного электронного коэффициента полезного действия (КПД) и неизменной функции $G(\zeta)$, которая характеризует связь между энергией электронов и структурой реального поля, с ростом энергии электронов следует:

1) в слабoreлятивистском случае (6) увеличивать относительную длину прибора L/λ пропорционально скорости электронов или увеличивать произведение $\lambda E_{\parallel}^{\omega}$ пропорционально скорости электронов;

2) в ультрарелятивистском случае (7) увеличивать отношение L/λ пропорционально квадрату энергии электронов или уменьшать произведение $\lambda E_{\parallel}^{\omega}$ обратно пропорционально энергии электронов.

Таким образом, законы подобия для классических и релятивистских приборов, выведенные в [10], существенно различаются и в некотором смысле даже противоположны друг другу (рис. 2 [14, 10]). На рисунке 2 приведены зависимости максимального КПД и оптимальных значений параметров $\alpha_{\parallel} = (e\dot{\lambda}E_0)/\varepsilon_{\text{rest}}$, $\varepsilon = (v_0 - v_{\text{ph}})/v_0$ и L/λ

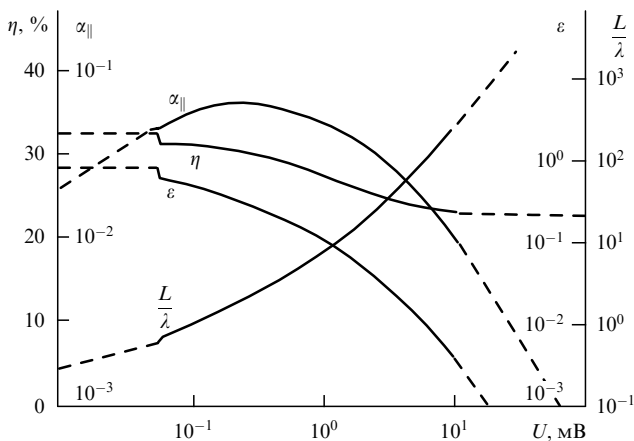


Рис. 2. Зависимость максимального КПД и оптимальных значений параметров α_{\parallel} , ε и L/λ от энергии электронов [10].

от энергии электронов при взаимодействии электронного пучка с волной постоянной амплитуды E_0 и фазовой скоростью v_{ph} .

Интересно, что уравнения, описывающие движение электронного потока, и уравнения для упомянутого ранее ЛСЭ имеют сходную структуру. В работе [15] приведены универсальные асимптотические уравнения движения электрона в ЛСЭ:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt'} = \kappa \text{Re} [\alpha \exp(j\theta)], \\ \frac{d\theta}{dt'} = \delta + \mu w, \end{cases} \quad (8)$$

где $t' = \omega t$, $w = 1 - \gamma/\gamma_0$, $\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$, $\alpha = (eE_0^{\omega})/(\omega c m_0 \gamma_0)$ — безразмерная амплитуда волны, δ — начальная расстройка резонанса, μ — параметр группировки, κ — параметр связи электрона с волной, характеризующий величину проекции вектора скорости электрона на электрическое поле волны.

Факт совпадения уравнений движения электронов в ЛБВ типа "О" с универсальными асимптотическими уравнениями для приборов с инерционной группировкой электронов с точностью до постоянных подчёркивается и в [16].

В одном из вариантов ЛСЭ используется индуцированное излучение релятивистского электронного потока с высокой энергией частиц, поперечные колебания которых возбуждаются при движении в пространственно-периодическом магнитном поле ондулятора (или вигглера), выполненного в виде бифилярной проволочной спирали. Как справедливо отмечает автор работы [17], электроны в ЛСЭ не совсем свободны: для эффективного взаимодействия с электромагнитной волной они движутся в магнитном поле по непрямолинейной траектории, т.е. с ускорением. Для использования индуцированного излучения в ЛСЭ необходима синхронизация отдельных излучателей, которая имеет место, как и в ЛБВ, в результате продольной группировки электронов. Тогда можно говорить о том, что различие ЛБВ и ЛСЭ состоит в использовании разных видов индуцированного излучения: в ЛСЭ — ондуляторного, а в ЛБВ — черенковского.

Заканчивается статья [1] так: "Можно думать, что лампа с бегущей волной войдёт с течением времени в повседневный обиход радиотехники сантиметрового диапазона".

С тех пор прошло более семидесяти лет. Эволюция ЛБВ впечатляет. Лишь ознакомившись с программой двух последних международных конференций по вакуумной электронике 2018 и 2019 гг. (IVES 2018, IVEC 2019), можно понять, что и сегодня ЛБВ активно исследуются и широко применяются в разных областях, начиная от стандартных телекоммуникационных систем, теле- и цифрового радиовещания до современного цифрового Интернета и мультимедийных услуг. Лампы различной конфигурации и мощности используются в наземных, воздушных или судовых системах связи. Они применяются в радиолокационных станциях и в бортовых радарх, а также для радиоэлектронного подавления. Мощные и высокоэффективные ЛБВ могут быть использованы для спутниковой системы глобального позиционирования (GPS, Galileo) на низкой околоземной орбите и для их непрерывного обновления. Некоторыми примерами наземных или бортовых систем связи, исполь-

зующих СВЧ-лампы фирмы Thales Electron Devices (TED, Франция), являются DirectTV, EchoStar и Astra для DBS, Iridium для коммерческих систем и Milstar, Syracuse, Stentor, SBIRS для систем военного назначения [18].

Кроме того, ЛБВ является незаменимым устройством и в конструкции спутниковых систем, предназначенных для передачи сигналов. Существует ряд требований, предъявляемых к усилителям, для успешной работы в космосе. Среди них можно выделить высокое отношение сигнал/шум, широкополосность, также немаловажной является способность устройства перенести запуск ракеты и сохранение работоспособности в течение нескольких лет в космосе. Указанным требованиям так или иначе удовлетворяют ЛБВ.

В рамках международной конференции IVEC 2018 был представлен доклад, посвященный миссии "Кассини" [19]. Миссия "Кассини-Гюйгенс" была задумана и основана как международный проект объединённой научной группы NASA, ESA (Европейского космического агентства) и ASI (Итальянского космического агентства). Цель миссии заключалась в исследовании Сатурна, его колец и лун. Космический аппарат "Кассини" был запущен в октябре 1997 г., миссия длилась около 20 лет. В сентябре 2017 г. команда управления завершила миссию. На орбите Сатурна аппарат провёл почти 13 лет, за это время он отправил на Землю 635 Гб данных и 453 тыс. снимков. В течение 20 лет все сведения о состоянии космического аппарата и все научно-исследовательские данные на Землю передавались с помощью 20-Вт усилителей на ЛБВ (8,40–8,45 ГГц), работавших бесперебойно.

В докладе [19] представлен ряд данных за 20 лет (ток катода, ток спирали и т.д.), подтверждающих стабильность работы ЛБВ, которая была разработана и создана в Hughes Aircraft Company Electron Dynamics Division (теперь L3-Communication Devices, США). Конечно же, приведён лишь один пример из хорошо известных. Можно ещё говорить и о космическом зонде "Розетта" [20], целью которого было исследовать комету 67P/Чурюмова–Герасименко (запуск 26.02.2004, длительность полёта более 12 лет), где также передача данных осуществлялась с помощью ЛБВ; и о запущенном в 2006 г. для изучения Плутона и его естественного спутника Харона аппарате "New Horizons" [21], исходящий сигнал с которого усиливается 12-Вт ЛБВ (полная программа рассчитана на 15–17 лет); и о программе "Voyager" [22] по исследованию дальних планет Солнечной системы (аппараты "Voyager-1" и "Voyager-2" запущены в 1977 г. и находятся в полёте более 41 года).

В [23–31] описаны параметры ламп, созданных в последние годы для работы в условиях космоса. Среди них, например, известна компактная ЛБВ с рабочим диапазоном частот 12–14 ГГц с мощностью 1250 Вт [26, 27], разработанная в Communications and Power Industries (CPI, USA), 170-Вт ЛБВ в диапазоне 17–20 ГГц [28], созданная в L3 Technologies Electron Devices Division (L3 EDD, USA), 40-Вт ЛБВ в диапазоне 37,5–42,5 ГГц [29] компании Thales Electron Devices (TED) при поддержке Французского космического агентства (French Space Agency CNES, France) и др.

Релятивистские ЛБВ демонстрируют высокую мощность и КПД и представляются перспективными источниками излучения для создания ускорителей заряженных

частиц высоких энергий [32]. Имеется множество работ по исследованию релятивистских ЛБВ, однако они носят преимущественно теоретический характер или в них представляются результаты численного моделирования (см., например, [33–38]).

В ходе развития релятивистской электроники были созданы и некоторые экспериментальные образцы релятивистских ЛБВ (например, [39, 40]). Следует выделить работу [41], в которой представлены результаты экспериментального исследования одно- и двухкаскадного секционированных релятивистских ЛБВ-усилителей. С помощью секционирования замедляющей системы решается проблема самовозбуждения лампы (см., например, [42]). В однокаскадном усилителе на частоте 8,8 ГГц при энергии электронов 850 кэВ и токе 1,6 кА было получено максимальное усиление 33 дБ, выходная мощность 110 МВт в полосе 0,2 %. В двухсекционной ЛБВ при прочих равных условиях выходная мощность составила 400 МВт, КПД 45 % и полоса усиления 1,5 %. Секции были разделены графитовыми вставками, что внесло затухание порядка 30 дБ. В упомянутой работе отмечается, что недостатком такого варианта релятивистской лампы было возбуждение колебаний на боковых частотных полосах.

В работе [43] представлен более эффективный метод секционирования, что позволило в диапазоне 8–12 ГГц получить 1 ГВт излучаемой мощности с коэффициентом усиления 47 дБ и КПД 23 %. При этом энергия и ток электронного пучка составили 0,8 МэВ и 6 кА соответственно. Интересно, что с ростом выходной мощности укорачивался ВЧ-импульс: увеличение мощности с 0,3 до 1,1 ГВт привело к уменьшению длительности импульса с 250 до 90 нс.

Более ранней работой, в которой представлено описание экспериментальных результатов для промышленного образца релятивистской ЛБВ, является [44]. На частоте 95 ГГц было получено усиление 20 дБ при непрерывной мощности 5 кВт.

На протяжении последних десяти лет наблюдается постоянный интерес к вакуумным генераторам и усилителям терагерцового диапазона частот. Некоторое время назад в Европе и США создавались разные программы [45–48], направленные на разработку компактных вакуумных усилителей и освоение соответствующего диапазона. Выбор указанного участка миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн авторы проектов обосновали необходимостью расширения рабочей полосы частот, которая определяет пропускную способность каналов связи, используемых для обмена данными между военными системами различного назначения. В связи с этим в последние годы большая часть исследований направлена на создание ЛБВ в терагерцовом диапазоне частот с приемлемыми характеристиками.

Известен пример уникальной широкополосной ЛБВ [49], разработка которой проводилась в рамках программы HiFIVE (High Frequency Integrated Vacuum Electronics) [45] с применением современных наноразмерных технологий. Для работы в лампе используется ленточный электронный пучок с плотностью тока 438 А см^{-2} . Конструкция электронной пушки включает в себя нанокompозитный вольфрамовый катод. Середина рабочего диапазона частот составляет 220 ГГц. В диапазоне 207–221 ГГц получен коэффициент усиления 27 дБ (при напряжении накала 20,9 кВ), выходная мощность 11 Вт, а в

диапазоне 197–202 ГГц коэффициент усиления составил 30 дБ (при напряжении накала 21,8 кВ). Проведённые измерения показали, что полоса пропускания созданной лампы превышает 50 ГГц с потерями около 5 дБ. Подробнее об этапах изготовления ЛБВ и обо всех параметрах можно прочитать в [49].

Разработана и протестирована ЛБВ, работающая на частоте 0,32 ТГц [50]. В качестве замедляющей системы применяется цельнометаллический петляющий волновод, созданный на основе высокоточной технологии фрезерования. В усилителе используется фокусировка периодическим магнитным полем. Наибольшая выходная мощность составляет более 134 мВт при входной мощности 0,5 мВт (коэффициент усиления 19,6 дБ).

Не меньший интерес представляют разработки компании Northrop Grumman Electronic Systems (США). Среди них можно выделить компактный ЛБВ-усилитель, работающий на частоте 0,85 ТГц с шириной полосы около 14 ГГц [51]. В основе его конструкции лежит петляющий волновод, созданный с использованием технологии глубокого реактивного ионного травления (Deep Reactive-Ion Etching, DRIE). Для фокусировки и транспортировки электронного потока применяется магнит, обеспечивающий продольное магнитное поле величиной 9 кГс. Плотность тока в лампе достигает 311 А см^{-2} при токе пучка 2,8 мА. В [51] приведены основные характеристики созданного усилителя на основе ЛБВ: выходная мощность составляет 141 мВт, коэффициент усиления 26,5 дБ, КПД 0,54 %.

Дальнейшее проведение исследований позволило на основе имеющихся структурных элементов для лампы (замедляющая система типа "петляющий волновод", солениод, обеспечивающий магнитное поле 9 кГс, термокатод) создать ЛБВ-усилитель, работающий на частоте 1,03 ТГц с шириной полосы 5 ГГц [52]. Ток пучка составляет 2,3 мА, коэффициент усиления равен 20 дБ.

Благодаря развивающимся технологиям появляются возможности реализовать различные идеи лампы с бегущей волной. Созданы ЛБВ с автоэмиссионными катодами (холодными катодами), например, [53, 54], что позволило уменьшить размеры прибора и существенно снизить значения приложенного напряжения для достижения тех же значений тока. Также известны работы, в которых в конструкцию ЛБВ предлагается ввести второй электронный поток [55], что тоже может дать определённые преимущества.

В работе [56] предложен усилитель бегущей волны, работающий в диапазоне частот 0,75–1,1 ТГц. Главная его особенность заключается в том, что вместо обычного электронного потока используется плазма. Авторы [56] указывают, что преимущества использования плазмы заключаются, во-первых, в том, что термоэлектронная эмиссия может быть заменена ионизацией газа, во-вторых, электростатические линзы и магнитные фокусирующие структуры могут быть исключены или упрощены, поскольку плазма может быть самофокусирующейся, в-третьих, может быть достигнуто более высокое усиление мощности при большей эффективности; имеется также ряд других положительных моментов. В статье подробно описывается технология изготовления петляющего волновода, приводятся результаты численного моделирования и натурального эксперимента. Коэффициент усиления на частоте 0,9 ТГц в полосе шириной 1 ГГц составляет 12 дБ.

В последнее время известны попытки создать ЛБВ с использованием структур, содержащих метаматериалы, предварительно анализируя процессы, происходящие в такой лампе, на основе численного моделирования (см., например, [57–59]). Согласно приведённому в [60] определению, метаматериал — композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Впервые появился обзор исследований известных в мире групп, в котором описаны серьёзные попытки создания новых вакуумных электронных СВЧ-приборов, содержащих метаматериалы [61]. "...Вакуумные электронные СВЧ-приборы с метаматериалами имеют следующие свойства: малые размеры, высокую мощность, высокий КПД и высокое усиление. Эти новейшие приборы имеют многообещающие приложения в радиолокации, в системах связи, электронной войне, СВЧ-нагреве, в ускорителях, распознании образов и многих других областях" [61].

2. Краткая история, к которой все привыкли

Интересно отметить, что за минувшие годы произошли не только изменения в конструкции прибора, но стали известны некоторые новые факты из истории создания ЛБВ.

По-видимому, большинству разработчиков, имеющих отношение к теоретическому и экспериментальному исследованию СВЧ-устройств, в которых реализуется длительное взаимодействие электронного потока с замедленной электромагнитной волной, известен тот факт, что лампу бегущей волны изобрёл и создал австрийский архитектор по образованию, но физик по призванию Рудольф Компфнер. Дальнейшее развитие прибора связано с именем великого американского инженера Джона Пирса. И это ни у кого не вызывало сомнений.

Правда, следует отметить, что в статье Варнеке 1954 г., перевод которой представлен в [62], содержатся указания на два патента Гаева, датированных 1933 г., патент Линденблада 1940 г. и патент на генератор со стоячей волной, предложенный Клавье и Ростасом в 1937 г.

В 1994 г. в свет вышла книга Гилмора [63]. В русскоязычной литературе её перевод появился только в 2013 г.

В книге Гилмора глава "Ранняя история ЛБВ" начинается так: "Возможность взаимодействия между электронным пучком и ВЧ-системой была обнаружена Гаевым [64, 65] в 1933 г.". И далее Гилмор пишет: "В патентах этого года Гаев описал лампы с отклонением электронного пучка, которые могут быть использованы в качестве детекторов или осциллографов и содержат в себе некоторые черты спиральных ЛБВ. В устройствах Гаева ВЧ-сигнал, распространяющийся в спиральной структуре, был использован для отклонения полого электронного пучка. Скорость электронного пучка равнялась скорости распространения бегущей волны по спиральной структуре. Гаев не предположил, что при этом может произойти усиление волны".

В [63] есть упоминание также о работе нидерландского исследователя Клааса Постумуса 1935 г. [66], где он впервые описал магнетронный генератор с гладким анодом, в котором эффективный энергообмен и усиление

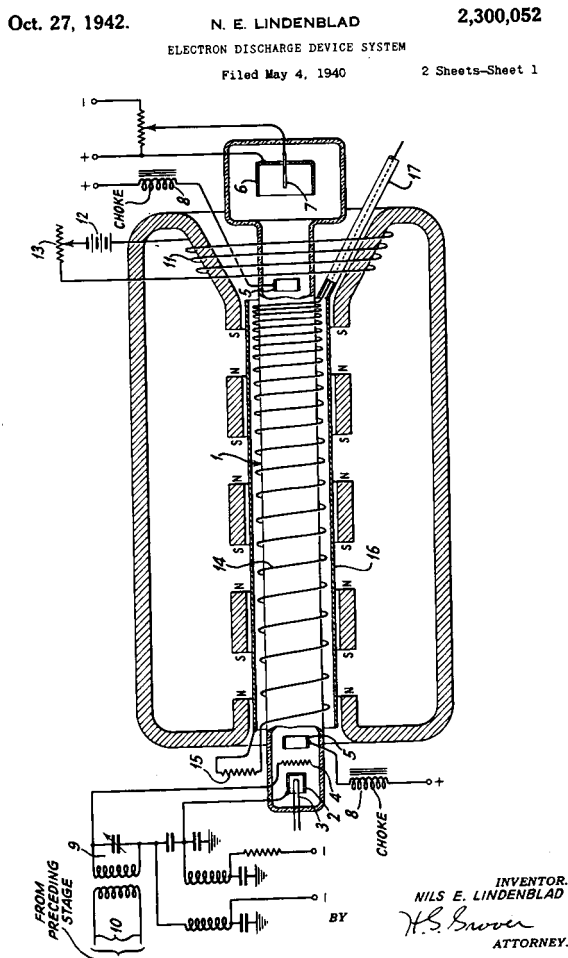


Рис. 3. Рисунок из патента Линденблада [67].

ние ВЧ-волны происходят за счёт взаимодействия электронов с тангенциальной компонентой бегущей волны, вращающейся со скоростью, равной средней скорости электронов.

Далее Гилмор приводит рисунок усилителя бегущей волны из патента Линденблада (рис. 3), датированного 1940 г. [67]. Линденblad описал усилитель с широкой полосой пропускания для ультракоротких волн, в котором энергия отбиралась от модулированного пучка в результате взаимодействия с замедленной бегущей волной. В книге Гилмора указано, что "первая лампа Линденблада была, очевидно, модифицированной версией лампы Гаева с индуктивным выводом (которая в 1982 г. стала называться клистродом)". Конструкция Линденблада выглядит достаточно современной, поскольку в ней используется даже принцип изохронности (изменение шага спирали) для поддержания синхронизма волны и электронного потока и элементы магнитной периодической фокусировки.

Далее в истории ЛБВ по Гилмору следуют Пирс (рис. 4) и Компфнер (рис. 5).

В 1942–1943 гг. Компфнер создал первый усилитель с бегущей волной, эффективно работавший на сантиметровых волнах. Обстоятельства сложились так, что этот материал был опубликован лишь в 1946 г., примерно в тот момент, когда Пирс и его коллеги описывали лампу аналогичной конструкции [63]. Они показали преимуще-



Рис. 4. Джон Р. Пирс [68].



Рис. 5. Рудольф Компфнер [69].

ства, вытекающие из основного принципа действия, для получения больших КПД и широких полос пропускания на СВЧ.

Однако недавно появилась статья об Андрее Гаеве, написанная Джейком Копеландом в соавторстве с сыном Гаева [70]. В этой статье есть поясняющая её вставка, которая выглядит как эпиграф: "Патент, ожидающий признания. Патент Гаева, поданный в 1933 г. для примитивного типа ЛБВ, был в значительной степени проигнорирован".

3. Андрей Гаев: от сёрфинга к спутниковой лампе с бегущей волной

Родился Андрей Гаев (рис. 6) в Москве. Вскоре после революции в России его семья бежала в город Харбин в Китае. Ему было 15 лет. В Харбине он изучал электротехническое машиностроение в Российском политехническом институте, окончив его в 1928 г.

История ЛБВ Гаева начинается в Калифорнии в 1931 г., куда он приехал после нескольких лет пребывания в Китае. Темой его работы была микроволновая электроника. В то время она была передовым краем высоких технологий. Никто не знал, как эффективно усиливать СВЧ-сигналы, которые были бы выше по частоте вакуумных ламп того времени.

Молодой инженер начал работать над лампой, в которой ВЧ-волна распространяется в спиральной системе, в то время как электроны движутся параллельно оси спирали. Скорость волны вдоль оси спирали снижается и оказывается равной скорости медленно движущихся электронов. В прототипе Гаев использовал два параллельных спиральных электрода с электронным потоком, движущимся между ними. Когда он зарегистрировал свой первый патент на лампу в октябре 1933 г., он использовал термин "бегущая волна". Это был первый пример того, что позднее превратилось в спиральную ЛБВ.

Идея новой лампы появилась у Гаева после наблюдения за сёрфингистами на Санта Моника Бич. Он увидел, что если продольная составляющая скорости доски и фазовая скорость волны совпадают, то это позволяет эффективно использовать энергию волны.

Есть мнение, как и указано в книге Гилмора [63], что Гаев не углядел возможности усиления с помощью этой лампы. Однако, когда Гаев предлагал свой проект, он в патенте подчёркивал три пути использования лампы, в том числе и для "усиления... экстремально высоких ра-



Рис. 6. Андрей Гаев [70].

диочастот" [64, 65]. Таким образом, нет сомнения в том, что он знал о способности его лампы усиливать частоты, которые лежат выше верхних пределов обычных для того времени вакуумных ламп. Более того, новая лампа была не только рисунком в статье, он использовал ЛБВ для построения портативного радиопередатчика и приёмника, действующего на частоте 750 МГц.

В марте 1934 г. Гаев покидает Калифорнийский технологический институт, чтобы стать исследователем в RCA (Radio Corporation of America) и в инженерном департаменте в Харрисоне, Нью-Джерси. Глава Калтеха Роберт А. Милликен, действуя от руководства университета, предоставил Гаеву права на его изобретение. Вскоре Гаев продал RCA патентные права на ЛБВ вместе с работающим прототипом за значительную по тем временам сумму в 12000 долл. США — приблизительно 200000 долл. США на сегодняшний день. Позднее, в 1936 г., RCA получила и второй патент на конструкцию Гаева. Однако компания не разрешила Гаеву продолжать исследования, рекомендуя ему сконцентрироваться на развитии миниатюрных ламп и цепей для использования в телевизионных приёмниках.

Удивительно, но ЛБВ впоследствии была переоткрыта дважды. Следующее открытие состоялось в 1940 г., когда Нильс Линденblad, специалист по антеннам в RCA, зарегистрировал патент на усовершенствованную ЛБВ [67]. Это было шесть лет спустя после того, как Гаев продал RCA свой патент 1933 г. Вряд ли Линденblad не знал о ранней работе Гаева: один и тот же поверенный в патентных делах RCA Харри Гровер занимался и патентом Линденblada, и патентом Гаева 1936 г.

Согласно мнению авторов [70], остаётся всё же неясным, как Линденblad, который не занимался лампами, пришёл к исследованию спиральной замедляющей системы и подал заявку на патент. Хотя Линденblad и Гаев в одно время работали в RCA, их лаборатории находились на расстоянии 100 км друг от друга — поэтому не очевидно, что они когда-либо встретились.

Возможно, обратить внимание Линденblada на патенты Гаева мог Фред Крогер. В 1933 г. в Калтехе Крогер помогал Гаеву построить СВЧ-передатчик и приёмник, которые тот использовал, чтобы показать возможности ЛБВ. И когда Гаев переезжал из Калифорнии в Нью-Джерси, именно Крогер перевозил в багажнике своего автомобиля прототип ЛБВ. Как известно авторам той статьи, о которой идёт речь [70], Крогер приложил руку и к прибыльной продаже патентов Гаева RCA.

Сам Крогер, как и Линденblad, работал в RCA Communications в Роки Пойнт, Нью-Йорк, и они оба были ключевыми фигурами в первых проектах, связанных с телевидением. Может быть, целью Крогера было, чтобы Линденblad "оживил" дальнейшую разработку ЛБВ в RCA, поскольку Гаеву это было запрещено.

Андрей Гаев внёс огромный вклад в военную радиолокацию и электронику. Помимо ЛБВ он изобрёл целый ряд вакуумных ламп. Это электронно-волновая (двухлучевая) [71] и резистивная [72] лампы. О них в своё время были опубликованы статьи В.М. Лопухина и А.А. Веденова в журнале *УФН* в 1950 и 1954 гг. [73, 74]. Другое его изобретение — усилительная лампа с индуктивным выводом (ИОТ) [75]. Её изобретение сделало RCA в 1939 г. пионером в телевидении с передатчиком на Empire State Building в Нью-Йорке и серией релейных станций, pokrывающих Лонг-Айленд.

Гаев также внёс вклад в компьютеризацию: разработал технологию бистабильного хранения информации для мониторов и написал одну из первых работ по дисплею для графиков и текста. Предвидя возможности виртуальной реальности, он уже тогда изобрёл лазерное устройство для сканирования произведений искусства, строений и других 3D объектов и технику их виртуального воссоздания. Однако ЛБВ остаётся величайшим из всех его изобретений.

В 1950-е годы, когда уже появились работы других исследователей по ЛБВ, Гаев писал в автобиографии: "Интересно заметить, что принцип действия недавно анонсированного как революционный прибора, известного под названием ЛБВ, основан на принципе, впервые открытом мною в моих патентах №№ 2.064,469 и 2.233,126, которые описывают фундаментальные идеи ЛБВ". Как отмечают авторы статьи [70], Гаев был человеком скромным и не искал публичного признания и славы. "Но оставив такую запись в автобиографии, он сделал этот шаг, соединяющий его с таким замечательным прибором..." [70].

В 1950 г. Гаев влился в исследования и развитие лабораторий Hughes Aircraft в штате Калифорния. Здесь от исследователя лаборатории он поднялся до вице-президента компании. Лаборатория Гаева начала быстро развивать продвинутой версии ЛБВ. В рамках крупной космической программы была разработана ЛБВ весом около 1 фунта (~ 0,45 кг) с целью размещения широкополосного спутника-ретранслятора на стационарной орбите над Атлантикой. Hughes Syncom стал первым в мире геосинхронным спутником связи, успешно достигнув орбиты в 1963 г.

"Должно быть, это был повод для гордости и некоторых смешанных чувств, когда устройство, которое Гаев предсказал в 1920–1930-е годы и занимался им и которое редко связывалось с его собственным именем, успешно передавало множество человеческих голосов в пространстве" [70].

4. Рудольф Компфнер: "...так и быть, — пусть поле движется вместе с электронами"

Спустя несколько лет ЛБВ была открыта в третий раз в университете Бирмингема в Англии. В 1940 г. в специальной лаборатории Британского адмиралтейства физики создали сверхмощный для того времени генератор микроволн — многорезонаторный магнетрон. Рудольф Компфнер "влился" в эту лабораторию в 1941 г. Днём он работал над клистроном, а вечерами — над различными собственными конструкциями, включая ЛБВ-усилитель. В своём эссе "Изобретение ЛБВ" [76] Компфнер пишет, что мысль об использовании бегущей волны, взаимодействующей с электронами, возникла у него, когда работа над малошумящим клистроном зашла в тупик. "...Раз время пролёта через зазор представляет такую серьёзную трудность и взаимодействие со стационарным полем получается слабым, то так и быть, — пусть поле движется вместе с электронами, — мысль, в общем-то, достаточно очевидная", как отмечал это сам Компфнер.

Компфнер — фигура необычная для СВЧ-электроники. Необычна она прежде всего тем, что он получил диплом инженера-архитектора в Венской высшей технической школе в 1933 г. Начиная с 1934 г. и вплоть до 1941 г. он продолжал учёбу в области архитектуры в Англии,

совмещая её с работой в архитектурной конторе. Однако Компфнер всегда стремился стать физиком. В начале войны он был интернирован, и у него появилась возможность усовершенствовать свои знания в области физики. В дальнейшем, ещё во время войны, он освободился от интернирования и работал над СВЧ-лампами для Морского министерства.

Компфнер построил свои первые ЛБВ в Бирмингемской лаборатории. Результаты были хорошими, и Британское адмиралтейство приобрело патент на его имя в июне 1944 г.

Компфнер описал в 1946 г. в статье в *Wireless World* [77] внешний вид ЛБВ, ставшей прототипом будущей коммерческой версии. Его лампа мало отличалась от менее известной конструкции Линденблада 1942 г. Ирония в том, что Компфнер переоткрыл ЛБВ именно в то же время, в 1942–1943 гг., но опубликовать результаты удалось лишь в 1946 г.

Несмотря на то что лампа Компфнера была основана на тех же принципах, что и лампа Гаева, её конструкция существенно отличалась. У Гаева электронный поток проходил, окружая поверхность спирали. Компфнер, подобно Линденладу, использовал прецизионную электронную пушку, чтобы направить поток вдоль центральной оси спирали. Такой пушки не было во время ранних работ Гаева. Результатом было более высокое усиление, так как теперь оказались задействованы и скоростная модуляция, и электронная группировка. Эти явления описали в конце 1930-х гг. Оскар Хэйль и Агнесс Арсеньева-Хэйль применительно к модели клистрона [78]. И всё же Гаев был одним из первых, кто использовал эти принципы в 1939 г. в своей лампе с индуктивным выводом [79].

В эссе "Изобретение ЛБВ" Компфнер пишет, что ключевая идея использовать спиральный электрод не была его собственной. Во время попытки создать ВЧ-осциллоскоп он, как и Андрей Гаев, понял, что если скорость электромагнитной волны уменьшить до скорости электронов, то будет наблюдаться взаимодействие. Однако Компфнер не имел представления, как это можно реализовать. В ходе обсуждения с коллегами было предложено использовать спираль. Правда, на какое-то время эта идея была забыта, о ней вспомнили, только когда столкнулись с трудностями, связанными с уменьшением шумов в клистрономе.

В группе Бирмингемского университета был человек, который считался специалистом по линиям передачи. Компфнер поинтересовался его мнением, но тот заверил, что по такой спирали вряд ли будут распространяться волны с частотой более 10 МГц. Проверить было сложно. Компфнер взял стальной прут, намотал на него медную проволоку, немного раздвинул витки, чтобы не было короткого замыкания. Вставил спираль в коаксиальный проводник от детектора стоячей волны, подал сигнал с длиной волны 10 см и грубо, но получил стоячую волну. Когда он измерил среднее расстояние между пиками, то оказалось, что скорость уменьшилась в семь раз. Как пишет Компфнер, "я был настолько тактичным, что не побежал и не рассказал тотчас же об этом тому специалисту, но больше я с ним уже не советовался" [76].

Это был обнадеживающий результат. Компфнер показал, что число 7 довольно точно соответствовало шагу намотки спирали. Он восхищался, насколько всё оказалось просто.

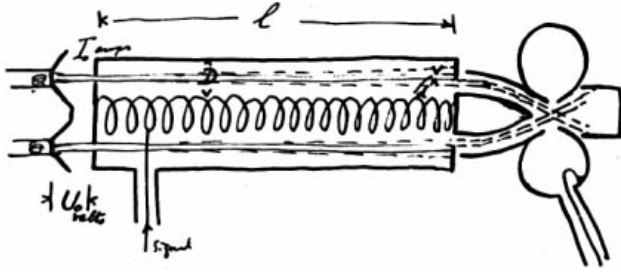


Рис. 7. Страницка из записной книжки Компфнера, датированная 10 ноября 1942 г. [76].

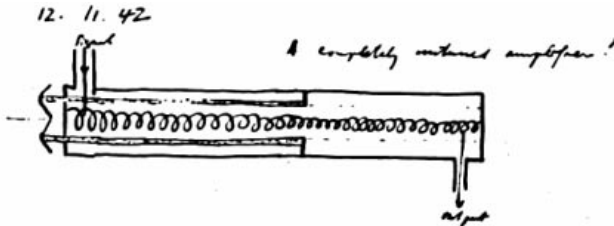


Рис. 8. Страницка из записной книжки Компфнера, датированная 12 ноября 1942 г.: "Совершенно не настроенный усилитель!" [76].

На рисунке 7 приведён эскиз из записной книжки Компфнера от 10 ноября 1942 г., где полый пучок движется между спиралью и внешним проводником к выходному резонатору, аналогичному клистронному. На рисунке 8 — от 12 ноября 1942 г. — выходной резонатор заменён секцией со спиралью, что приводит к неожиданному выводу: "совершенно не настроенный усилитель!".

Достаточно много времени у Компфнера ушло на то, чтобы понять и разобраться, что же происходит, когда пучок электронов движется внутри спирали. Какое напряжение будет наведено в спирали, если известен ток пучка? Какое поле будет внутри спирали?

Его стала волновать проблема, что "если поле в спирали создаёт переменный ток пучка, а этот ток наводит поле в спирали, то какой ток создаёт это последнее поле? [Мы упоминали об этом во введении. — примеч. авт.] А дальше что же — этот ток наводит вторичное поле, вторичное поле создаёт вторичный ток, вторичный ток — третичное поле и так далее?" [76]. Он пришёл к выводу, что задачу на самом деле нужно рассматривать как бесконечный ряд.

Так возник в электронике метод последовательных приближений, который применительно ко всем приборам с распределённым взаимодействием развил Владимир Николаевич Шевчик в Саратовском государственном университете. Вклад в развитие этого метода внёс и профессор Московского государственного университета Владимир Михайлович Лопухин, с указания на работу которого [1] начинается наша статья.

Прежде чем начать делать лампу, Компфнер, по существу, построил достаточно полную теорию усиления слабого сигнала при взаимодействии электронного потока с бегущей электромагнитной волной.

В августе 1943 г. физическое отделение Бирмингемского университета распалось, большая часть сотрудников уехала в Лос-Аламос, чтобы принять участие в работе над атомной бомбой. Компфнер остался, и ему официально разрешили заниматься усилителем с бегущей волной. Теперь он приступил к разработке и созданию лампы.

Компфнер написал очень много об обстоятельствах своего "открытия" ЛБВ, выделив наиболее значительные в эссе. Но в этих пространственных воспоминаниях он никогда не упоминал раннюю работу Гаева, хотя в самом патенте на конструкцию ЛБВ 1953 г. Компфнер ссылается на первый патент Гаева. Однако Компфнер отмечает лишь важность работы Гаева о скоростной модуляции и электронной группировке применительно к ЛБВ.

Дальнейшая работа Компфнера проходила в Оксфорде в Кларедонской лаборатории. Здесь он закончил свою теорию, получив легко суммируемый ряд для поля в спирали. Были получены точное и асимптотическое выражение для возбуждённого поля в спирали. В асимптотическом случае поле росло с расстоянием экспоненциально. В литературе приводится лишь окончательное выражение, полученное Компфнером [76]. Как именно делал это Компфнер, нигде не опубликовано, поэтому приведём наш вариант вывода.

В частном случае точного синхронизма поле волны в конце лампы имеет вид

$$E(l) = E_0 \exp(-j\beta_0 l) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(j2\pi CN)^{3m}}{(3m)!}, \quad (9)$$

где $\beta_0 = \omega/v_{ph}$ — постоянная распространения волны в системе без электронного потока, $N = 1/\lambda$ — электрическая длина лампы, $C^3 = (I_0 K)/4V_0$ — параметр усиления Пирса.

Вспользуемся соотношением

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{y^{3m}}{(3m)!} &= A_1 (\exp(\alpha_1 y) + \exp(\alpha_2 y) + \exp(\alpha_3 y)) = \\ &= A_1 \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\alpha_1 y)^m}{m!} + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\alpha_2 y)^m}{m!} + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\alpha_3 y)^m}{m!} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда

$$\begin{aligned} y^0 : 1 &= 3A_1 & A_1 &= \frac{1}{3}, \\ y^1 : 0 &= A_1(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 0, \\ y^2 : 0 &= \frac{A_1(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2)}{2} & \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 &= 0, \\ y^3 : 1 &= A_1(\alpha_1^3 + \alpha_2^3 + \alpha_3^3) & \alpha_1^3 + \alpha_2^3 + \alpha_3^3 &= 3. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) следует, что $\alpha_2/\alpha_1 = (-1 \pm j\sqrt{3})/2$, $\alpha_3/\alpha_1 = (-1 \mp j\sqrt{3})/2$. Подставляя $\alpha_2/\alpha_1 = (-1 + j\sqrt{3})/2$, $\alpha_3/\alpha_1 = (-1 - j\sqrt{3})/2$ в последнее уравнение из (11), получаем, что $\alpha_1 = 1$. Возвращаясь к (9), находим для случая точного синхронизма ($\beta_0 \approx \beta_e$):

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_0}{3} \exp(-j\beta_e x) \times \\ &\times \left[\exp(j2\pi CN) + \exp\left(j2\pi CN \left(\frac{-1 + j\sqrt{3}}{2}\right)\right) + \right. \\ &\left. + \exp\left(j2\pi CN \left(\frac{-1 - j\sqrt{3}}{2}\right)\right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая только нарастающую парциальную волну, находим известную асимптотическую формулу для коэффициента усиления ЛБВ:

$$\begin{aligned} G &= 20 \lg \frac{1}{3} + 20 \frac{1}{2,3} \frac{\sqrt{3}}{2} 2\pi CN = A + BCN = \\ &= -9,54 + 47,3CN \text{ [дБ]}. \end{aligned} \quad (13)$$

В это же время Компфнер совместно с Джозефом Хаттоном открыл экспериментально и объяснил теоретически явление полного подавления сигнала в ЛБВ [80], которое имеет место при определённых значениях тока и потенциала пучка. Явление носит название эффекта срыва Компфнера и используется для измерения дисперсионных характеристик и сопротивления связи замедляющих систем.

Сам он отмечал: «Мне, конечно, приятно, что физический эффект назван моим именем — Kompfner dip condition, — но я не в восторге от термина "dip", это звучит слишком похоже на "drip" (drip — капать, что-то вроде "промокший Компфнер")» [76]. Это явление использовалось для измерения сопротивления связи и дисперсионных характеристик замедляющих систем.

Недавно было предложено использовать ЛБВ-подавитель, работающий в режиме срыва Компфнера, для пассивной синхронизации мод и генерации ультракоротких импульсов [81, 82]. В работе [83] представлено описание лабораторного макета и результаты экспериментального исследования гибридного генератора многосолитонных комплексов, в основу которого входит ЛБВ-подавитель, работающий в режиме срыва Компфнера как насыщающийся поглотитель. Его использование дало возможность экспериментально осуществить пассивную синхронизацию мод и получить генерацию многосолитонных комплексов в условиях конкуренции трёх- и четырёхволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий. Многосолитонные комплексы представляли собой импульсы "гигантской" амплитуды, формирующиеся в результате трёхволнового взаимодействия и имеющие длительности порядка единиц микросекунд, в которые вложены более короткие импульсы, формирующиеся за счёт четырёхволновых взаимодействий и имеющие длительности порядка десятков наносекунд.

При исследованиях ЛБВ Компфнер порой отвлекался и "сворачивал в сторону", обычно теряя несколько недель или даже месяцев на изучение других систем, в частности, на лампу с поперечным полем.

Он разработал лампу со спиралью из никеля и обнаружил, что изменение приложенного магнитного поля приводит к изменению потерь. Кроме того, этот эффект оказался критичным к температуре. Гриффит, увидев все эти эксперименты, сказал, что они представляют значительный интерес и что имеет место резонансное явление, поэтому лучше воспользоваться более удачной геометрией, а не спиралью. Однако Компфнер считал, что спираль — это "чудесная геометрия", и решил на этот раз не отвлекаться от основной темы. Гриффит с его позволения продолжил исследование и сделал простой резонатор, в котором одна стенка была покрыта железом, и таким образом открыл ферромагнитный резонанс. Компфнер пишет: "Вот как я упустил открытие ферромагнитного резонанса... В этом случае я сам себе на беду не решился свернуть в сторону".

Следует подчеркнуть: сам Компфнер не понял, что создал широкополосный усилитель.

Это понял Пирс, который считал: "Компфнеру повезло избавиться от ограничения полосы частот в усилителях (что до него радиоспециалистам никак не удавалось) именно благодаря непредубеждённости, свежести взгляда на вещи человека, до этого работавшего в другой области. Компфнер решил задачу просто, он по-

строил эффективный усилитель без резонансного контура" [84, с. 165].

Компфнеру хотелось создать генератор, который перестраивался бы по частоте в широких пределах при изменении ускоряющего напряжения, т.е. при изменении постоянной скорости v_0 электронов. Нужна была внутренняя обратная связь в системе электронного потока — электромагнитная волна. Как пишет сам Компфнер, он — самоучка в физике — не имел представления об обратных пространственных гармониках, у которых фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления, обеспечивая внутреннюю обратную связь. Поэтому он с большим трудом отказался от любимой им спирали, понимая, что ему нужна обратная волна. То, что такая волна была, Компфнер знал, поскольку в ряде случаев ЛБВ-усилитель самовозбуждался. И он придумал наглядную качественную картину взаимодействия электронов с электромагнитной волной, отказавшись от модели непрерывного взаимодействия и заменив её дискретной, изображённой на рис. 9. Нас интересует случай прямой волны (рис. 9а). Из рисунка видно, что для многократного взаимодействия электронов с ВЧ-полем волны, бегущей вдоль петляющего волновода — изогнутой линии передачи — со скоростью света c , нужно, чтобы они переместились из области, отмеченной на рис. 9а буквой А, в область Б на расстоянии p за время, такое же, за какое волна пройдёт вдоль петляющего волновода от области А до области Б. Тогда электрон в каждой последующей области, например в области Б, попадает в поле той же фазы, что и в предыдущей, например в области А. Сказанное можно выразить простым математическим условием

$$\frac{p}{v_0} = \frac{1}{c} \left(D + p + \frac{\lambda}{2} (2n + 1) \right), \quad (14)$$

где λ — длина волны в свободном пространстве, $n = 0, 1, 2, \dots$

Слагаемое $\lambda/2c$ в этом соотношении добавлено потому, что поле в петляющем волноводе изменяет направление, когда волна доходит до изгиба, и для обеспечения правильной фазы в области Б нужно дополнительное слагаемое.

В случае обратной волны фазовое условие, обеспечивающее эффективность многократного взаимодействия,

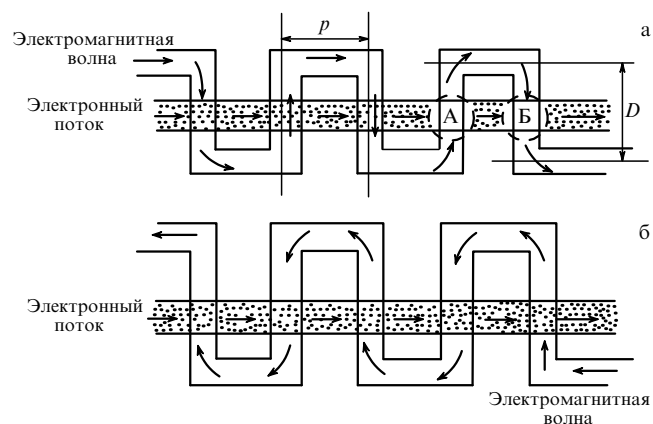


Рис. 9. Модель линии передачи, пронизываемой электронным потоком, которая используется для объяснения принципа работы лампы бегущей волны (а) и лампы обратной волны (б) [85].

запишется в виде

$$\frac{p}{v_0} = \frac{1}{c} \left(\frac{\lambda}{2} (n+1) - (p+D) \right). \quad (15)$$

Первая попытка изложить основы электроники СВЧ-приборов типа "О" на основе дискретных представлений в рамках линейной теории была предпринята в книге [86].

В настоящее время большое число авторов публикаций, как теоретических (см., например, [87–89]), так и экспериментальных (см., например, [50–52, 90, 91]) излагают результаты исследований взаимодействия электронного потока с полями петляющих волноводов. В теории речь идёт в основном о компьютерном моделировании нелинейных режимов. Эксперимент, благодаря новым технологиям, направлен на создание ЛБВ в терагерцовом диапазоне. Так что, по-видимому, прав Фрэнсис Бэкон (см. эпиграф).

5. Джон Робинсон Пирс — "...один из великих инженеров-провидцев"

Джон Пирс из Bell Labs, США, посетил Оксфорд в 1944 г. В 1951 г. Компфнер сам присоединился к Bell Labs. Впечатления Компфнера о визите Пирса были следующими:

"Он прочитал некоторые наши секретные заметки об этой работе, в которых ещё не было этой теории. И я помню, с какой живостью он проглотил всё это, а потом уехал назад и развил теорию, которая дала все результаты более строго, гораздо более изящно, чем сделал я суммированием членов, хотя следует напомнить, что он, так сказать, заранее знал ответ, в то время как мои теоретические шаги превосходили эксперименты... В сущности, его теория с самого начала правильно учитывала влияние потерь в спирали и рассинхронизма между пучком и волной... При первой возможности Пирс послал мне свою теорию ещё задолго до того, как она была опубликована. Несомненно, это был ещё один волнующий момент, когда я вдруг понял, как всё оказывается просто и красиво".

Именно этот вариант теории изложен в [1].

Пирс родился в 1910 г. Окончил Калифорнийский университет и 35 лет проработал в американской компании Bell Labs.

Его отношения с Гаевым были близкими, вплоть до того что он обедал однажды в доме Гаева по какому-то поводу в начале 1950-х. Тем не менее Пирс неустанно продвигал Компфнера и косвенно Bell Labs, утверждая их приоритет. Он написал в 1956 г.: "О происхождении ЛБВ я могу сказать только то, что она была изобретена во время войны в Англии австрийским архитектором Рудольфом Компфнером, который всегда хотел быть физиком". В книге Пирса "Лампа с бегущей волной" [92] содержится не более чем упоминание о вкладе Гаева.

Десять лет спустя Пирс рассказал Гаеву в письме о своих планах написать историческую статью о развитии микроволновых ламп [70]. В ней он планировал сослаться на использование Гаевым бегущих волн для взаимодействия с электронными потоками начиная с 1935 г. Но Пирс, к сожалению, не написал статью, содержащую столь важные в историческом плане сведения и ссылки.

Как указано в [70], только немногие специалисты представляли себе ценность ранней работы Гаева, подоб-

но Виктору Гранадштейну из Мэрилендского университета: так, в 2000 г. он написал, что Гаев "сделал совершенно необходимый вклад в развитие спиральных ЛБВ", заметив, что "ключевая" идея использования спирали для замедления волны была "реализована в первом патенте Андрея Гаева".

"В апреле 2002 г. ушёл из жизни один из великих инженеров-провидцев Джон Робинсон Пирс, чья карьера длилась в течение шести десятилетий. Одно время он был известнейшим учёным в области инженерии". Так начинается статья Д. Мортонна [68], в которой размещено интервью с Пирсом. В этом интервью Пирс упоминает о ЛБВ лишь как об одном из результатов его исследований.

Пирс был удивительно разносторонним человеком: он писал научно-фантастические рассказы, написал несколько научных и научно-популярных книг. Кстати, именно он предложил термин "транзистор". Он внёс огромный вклад в область спутниковой связи, участвуя в проектах "Эхо" и в создании спутника "Telstar".

Пирс написал книгу "Наука и музыкальный звук" [93]. В ней отражены его интересы к психоакустической и компьютерной музыке. Он заинтересовался вопросом о том, нельзя ли заменить отношение частот октавы 2:1 отношением частот 3:1 и назвать его тритавой. Правда, известно, что слушатели отдавали предпочтение сочинениям, написанным в традиционной манере.

На русском языке известны книги Дж. Пирса "Лампа с бегущей волной" [92], "Почти всё о волнах" [94] и другие [84, 95, 96].

6. Заключение

В заключение приведём ещё одну уникальную фотографию (рис. 10).

Такова история создания лампы с бегущей волной — прибора, который сегодня находится в центре внимания



Рис. 10. Джон Р. Пирс (слева), Рудольф Компфнер (в центре), Генри Найквист (справа), 1960 г. [68].

исследователей, работающих в области терагерцового диапазона. Дополнительные сведения о роли ЛБВ в истории развития телекоммуникации можно найти в работе [97], которая нам стала известна в процессе подготовки данной статьи.

Материалы статьи частично докладывались на пленарном заседании в рамках Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Саратов, СГТУ, 27–28 сентября 2018 г.); XVII Зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ (Саратов, СГУ, 5–10 февраля 2018 г.); XVI Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах" имени А.П. Сухорукова (Москва, МГУ, 27 мая – 1 июня 2018 г.).

Авторы признательны Алексею Владимировичу Титову, который обратил их внимание на статью об Андрее Гаеве [70].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-02-00666).

Список литературы

1. Лопухин В М *УФН* **36** 456 (1948)
2. Pierce J R, Field L M *Proc. IRE* **35** 108 (1947)
3. Рабинович М И, Трубецков Д И *Введение в теорию колебаний и волн* (М.–Ижевск: РХД, 2000); Пер. на англ. яз.: Rabinovich M I, Trubetskov D I *Oscillations and Waves in Linear and Nonlinear Systems* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989)
4. Трубецков Д И *Введение в синергетику. Колебания и волны* (М.: URSS. ЛИБРОКОМ, 2015)
5. Шевчик В Н, Трубецков Д И *Аналитические методы расчета в электронике СВЧ* (М.: Советское радио, 1970)
6. Вайнштейн Л А *ЖЭТФ* **94**(5) 40 (1988); Vainshtein L A *Sov. Phys. JETP* **67** 889 (1988)
7. Вайнштейн Л А *Теория дифракции. Электроника СВЧ* (М.: Радио и связь, 1995) с. 484
8. Вайнштейн Л А, Клевев А И, в сб. *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 8-я зимняя школа-семинар инженеров* Кн. 1 (Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989) с. 4
9. Вайнштейн Л А, Солнцев В А *Лекции по сверхвысокочастотной электронике* (М.: Советское радио, 1973)
10. Петелин М И, в сб. *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 3-я зимняя школа-семинар инженеров* Кн. 4 (Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1974) с. 179
11. Гинзбург В Л *ДАН СССР* **56** 253 (1947)
12. Гинзбург В Л *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **11** 165 (1947)
13. Валитов Р А и др. *Техника субмиллиметровых волн* (М.: Советское радио, 1969)
14. Кротова З Н и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **17** 413 (1974)
15. Братман В Л, Гинзбург Н С, Петелин М И, в сб. *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 5-я зимняя школа-семинар инженеров* Кн. 1 (Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981) с. 69
16. Гинзбург Н С, в сб. *Релятивистская высокочастотная электроника* Вып. 3 *Материалы III Всесоюз. семинара, г. Горький, 22–24 февраля 1983 г.* (Горький: ИПФ АН СССР, 1983) с. 26
17. Винокуров Н А, Шевченко О А *УФН* **188** 493 (2018); Vinokurov N A, Shevchenko O A *Phys. Usp.* **61** 435 (2018)
18. Eichmeier J A, Thumm M K (Eds) *Vacuum Electronics: Components and Devices* (Berlin: Springer, 2008); Пер. на русск. яз.: Айхмайер Дж, Тамм М (Ред.) *Справочник по вакуумной электронике. Компоненты и устройства* (М.: Техносфера, 2011)
19. Harvey W, Shell J, Burke L L, in *Proc. of the 19th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2018, Monterey, CA, USA, 24–26 April 2018* (New York: IEEE, 2018) p. 11, <https://doi.org/10.1109/IVEC.2018.8391520>
20. Rosetta. Science and Exploration, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta
21. New Horizons. NASA's Mission to Pluto and the Kuiper Belt, <http://pluto.jhuapl.edu/>
22. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Voyager, <https://voyager.jpl.nasa.gov/>
23. Fernandez Pena L et al., in *Proc. of the 17th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2016, Monterey, CA, USA, April 19–21, 2016* (New York: IEEE, 2016) p. 21
24. Yao L et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) p. 2.44
25. Li X et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 2195 (2018)
26. Chaudhary N et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) ID32
27. Chaudhary N et al., in *Proc. of the 19th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC, Monterey, CA, USA, 24–26 April 2018* (New York: IEEE, 2018) p. 55
28. Eze D C, Menninger W L, in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) ID66
29. Barsotti T et al., in *Proc. of the 19th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC, Monterey, CA, USA, 24–26 April 2018* (New York: IEEE, 2018) p. 15
30. Andre F et al., in *Proc. of the 20th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2019, 28 April–1 May 2019, Busan, Korea* (New York: IEEE, 2019) 8.3
31. Robertson C W et al., in *Proc. of the 20th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2019, 28 April–1 May 2019, Busan, Korea* (New York: IEEE, 2019) 8.2
32. Tsimring S E *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* (Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007); Цимринг Ш Е *Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков* (Н. Новгород: Ин-т прикладной физики РАН, 2012)
33. Kimura T et al., in *Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conf., PAC 93, Washington, DC, USA, May 17–20, 1993* Vol. 4 (Eds S T Corneliussen, L Carlton) (Washington, DC: IEEE, 1993) p. 2690
34. Gourinovitch A B, in *Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves. Proc. of the Fourth Intern. Kharkov Symp., Kharkov, Ukraine, June 4–9, 2001* Vol. 1 (New York: IEEE, 2001) p. 255
35. Batura M P, Kurayev A A, Sinitsyn A K, in *Proc. of the 15th Intern. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology, September 12–16, 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine* Vol. 1 (Sevastopol, 2005) p. 231
36. Fuks M I, Schamiloglu E, in *Proc. of the 14th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2013, 21–23 May 2013, Paris, France* (New York: IEEE, 2013)
37. Zhang Y et al., in *Proc. of the 16th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2015, April 27–29, 2015, Beijing, China* (Beijing: IEEE, 2015)
38. Zhang Y et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017)
39. Golkowski C et al., in *Proc. of the 26th IEEE Intern. Conf. on Plasma Sciences, ICOPS 1999, 21–24 June 1999, Monterey, CA, USA* (Piscataway, NJ: IEEE, 1999)
40. Абубакиров Э Б и др. *Письма в ЖТФ* **26** (4) 14 (2000); Abubakirov É B et al. *Tech. Phys. Lett.* **26** 141 (2000)
41. Shiffer D et al. *J. Appl. Phys.* **70** 106 (1991)
42. Gittins J F *Power Travelling-Wave Tubes* (New York: Elsevier, 1965)
43. Abubakirov E B et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1041 (2002)
44. Microwave D.A.T.A. Book, Vol. 52 (1985)
45. Field M et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 2122 (2018)
46. Palmer W D., in *Proc. of the 13th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2012, Monterey, CA USA, 24–26 April 2012* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 17
47. Haystead J J. *Electron. Defense* **41** (3) 24 (2018)
48. Di Carlo A et al., in *Proc. of the 10th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2009, Rome, Italy, 28–30 April 2009* (Piscataway, NJ: IEEE, 2009) p. 100
49. Baig A et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 2390 (2017)
50. Hu P et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 2164 (2018)
51. Basten M A et al., in *Proc. of the 13th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2012, Monterey, CA USA, 24–26 April 2012* (Piscataway, NJ: IEEE, 2012) p. 39
52. Tucek J C et al., in *Proc. of the 17th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2016, Monterey, CA, USA, April 19–21, 2016* (New York: IEEE, 2016) p. 37

53. Whaley D R et al., in *Proc. of the 31st Intern. Vacuum Nanoelectronics Conf., IVNC 2018, 9–13 July 2018, Kyoto, Japan* (New York: IEEE, 2018) p. 64
54. André F et al., in *Proc. of the 11th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2010, Monterey, CA, USA, May 18–20, 2010* (Piscataway, NJ: IEEE, 2010) p. 83
55. Kurayev A A et al., in *Proc. of the 43rd Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2018, 9–14 September 2018, Nagoya, Japan* (New York: IEEE, 2018) p. 613
56. Tabib-Azar M et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 3877 (2017)
57. Shin Y et al., in *Proc. of the Intern. Conf. on Communications and Electronics, 11–13 August 2010, Nha Trang, Vietnam* (New York: IEEE, 2010) p. 373
58. Ulisse G, Krozer V *IEEE Electron Device Lett.* **38** 126 (2017)
59. Bai N et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 2949 (2017)
60. Вендик И Б, Вендик О Г *ЖТФ* **83**(1)3 (2013); Vendik I B, Vendik O G *Tech. Phys.* **58** 1 (2013)
61. Duan Z et al., in *Proc. of the 19th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, Monterey, CA, USA, 24–26 April 2018* (New York: IEEE, 2018) p. 29
62. Warnecke R, in *Convegno di Elettronica e Televisione, Milano, 12–17 Aprile 1954 Vol. 2* (Roma: Consiglio Nazionale Delle Ricerche, 1955) p. 706; Пер. на русск. яз.: Варнеке Р, в сб. *Миллиметровые и субмиллиметровые волны* (Под ред. Р Г Мириманова) (М.: ИЛ, 1959) с. 11
63. Gilmour A S (Jr.) *Principles of Traveling Wave Tubes* (Boston: Artech House, 1994); Пер. на русск. яз.: Гилмор А С (мл.) *Лампы с бегущей волной* (М.: Техносфера, 2013)
64. Haeff A V, US Patent 2,064,469, filed October 23 (1933), issued December 15 (1936)
65. Haeff A V, US Patent 2,233,126, filed October 23 (1933), issued February 25 (1941)
66. Posthumus K *Wireless Eng. Exp. Wireless* **12** 126 (1935)
67. Lindenblad N E, US Patent 2,300,052, filed May 4 (1940), issued October 27 (1942)
68. Morton D *Proc. IEEE* **90** 1467 (2002)
69. American Institute of Physics. Rudolf Kompfner, <https://history.aip.org/phn/11507008.html>
70. Copeland J, Haeff A A *IEEE Spectrum* **52** (9) 38 (2015)
71. Haeff A V *Proc. IRE* **37** 4 (1949)
72. Birdsall C K, Brewer G R, Haeff A V *Proc. IRE* **41** 865 (1953)
73. Лопухин В М *УФН* **40** 592 (1950)
74. Лопухин В М, Веденов А А *УФН* **53** 69 (1954)
75. Copeland B J et al. *IEEE Ann. History Comput.* **39** (1) 9 (2017)
76. Kompfner R *The Invention of the Travelling Wave Tube* (San Francisco, CA: San Francisco Press, 1964)
77. Kompfner R *Wireless World* **53** 369 (1946)
78. Arsenjewa-Heil A, Hell O Z. *Phys.* **95** 752 (1935)
79. Haeff A V, Nergaard L S *Proc. IRE* **28** (3) 126 (1940)
80. Kompfner R J. *Brit. IRE* **10** (7) 283 (1950)
81. Гинзбург Н С и др. *Письма в ЖТФ* **43** (18) 47 (2017); Ginzburg N S et al. *Tech. Phys. Lett.* **43** 842 (2017)
82. Ginzburg N S et al. *Phys. Plasmas* **24** 023103 (2017)
83. Grishin S V et al. *Phys. Rev. E* **98** 022209 (2018)
84. Pierce J R *Electronics, Waves and Messages* (Garden City, NY: Hanover House, 1956); Пер. на русск. яз.: Пирс Дж Р *Электроника, волны и сообщения* (М.: Физматгиз, 1961)
85. Трубецков Д И *Введение в синергетику. Колебания и волны* (М.: ЛИБРОКОМ. URSS, 2019)
86. Булгакова Л В и др. *Лекции по электронике СВЧ приборов О-типа (дискретный подход к описанию взаимодействия электронного потока с ВЧ электромагнитными полями)* (Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1974)
87. Yan W et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) 2.34
88. Wang S et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) 3.6
89. Lu F et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 5103 (2018)
90. Zhang X et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **64** 5151 (2017)
91. Gong H et al., in *Proc. of the 18th Intern. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2017, London, United Kingdom, April 24–26, 2017* (New York: IEEE, 2017) 1D159
92. Pierce J R *Traveling-Wave Tubes* (New York: Van Nostrand, 1950); Пер. на русск. яз.: Пирс Дж Р *Лампа с бегущей волной* (М.: Советское радио, 1952)
93. Pierce J R *The Science of Musical Sound* (New York: Scientific American Library. W.H. Freeman, 1983)
94. Pierce J R *Almost All about Waves* (Cambridge, MA: The MIT Press, 1974); Пер. на русск. яз.: Пирс Дж Р *Почти все о волнах* (М.: Мир, 1976)
95. Pierce J R *Quantum Electronics* (Garden City, NY: Anchor Books, 1966); Пер. на русск. яз.: Пирс Дж Р *Квантовая электроника* (М.: Мир, 1967)
96. Pierce J R *Symbols, Signals, and Noise. The Nature and Process of Communication* (New York: Harper, 1961); Пер. на русск. яз.: Пирс Дж Р *Символы, сигналы, шумы. Закономерности и процессы передачи информации* (М.: Мир, 1967)
97. Minenna D F G et al. *Eur. Phys. J. H* **44** 1 (2019); arXiv:1803.11497

Traveling wave tubes: a history of people and fates

D.I. Trubetskov^{(1,2,*), G.M. Vdovina^(1,3,**)}

⁽¹⁾ Chernyshevsky Saratov State University,
ul. Astrakhanskaya 83, 410012 Saratov, Russian Federation

⁽²⁾ National Research Nuclear University MEPhI,
Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Scientific Production Enterprise “Almaz”,
ul. Panfilova 1, 410033 Saratov, Russian Federation

E-mail: ^(*)dtrubetskov@yahoo.com, ^(**)vdovinagm@gmail.com

The study of the interaction of electron beams with electromagnetic fields and of devices based on them is one of the central areas of the science of vibrations and waves. The journal *Uspekhi Fizicheskikh Nauk (Physics–Uspekhi)* published in the 20th century reviews devoted to the theory and description of new devices at that time. The theory and design of these devices and their place in the electromagnetic wave range have changed with time. Relativistic electronics has appeared. The terahertz range is being mastered. Some new facts related to the creation history of the traveling wave tube (TWT) have been discovered and are considered in the paper. Events in the creative methods of Andrei Haeff, Rudolf Kompfner, and John Pierce are described. Along with the TWT history of persons and their fates, the results of some modern TWT studies and developments for various purposes are presented.

Keywords: traveling wave tubes, Haeff, Kompfner, Pierce, history

PACS numbers: **01.65. + g, 84.40.Fe**

Bibliography — 97 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **190** (5) 543–556 (2020)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.12.038707>

Received 6 March 2019, revised 30 October 2019
Physics–Uspekhi **63** (5) (2020)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.12.038707>