

немагнитными примесями (примеси распределены каноническим способом) и модифицированной xy -модели, призванной описать особенности железо-ванадиевых сверхрешеток (Fe/V).

1. Наши данные свидетельствуют о том, что модель Изинга с немагнитными примесями при малых концентрациях примесей ($p \geq 0,8$) образует новый класс универсальности, отличный от соответствующего для чистой модели Изинга ($p = 1,0$).

2. Сильноразбавленные системы ($p \leq 0,7$) характеризуются другим набором критических индексов и образуют свой класс универсальности.

В таком случае существуют и две кроссоверные области:

1) область между чистой ($p = 1,0$) и слабо разбавленными системами ($p \geq 0,8$);

2) область между слабо разбавленными ($p \approx 0,8$) и сильно разбавленными системами ($p \leq 0,7$).

Возможно, противоречивый характер и несогласованность большинства результатов исследований этой модели объясняются наличием кроссовера и растянутостью таких кроссоверных областей.

Данные, полученные на основе исследования модифицированной xy -модели, позволяют определить особенности и условия перехода поведения магнитной сверхрешетки от трехмерного к квазидвумерному. Критические индексы обнаруживают зависимость от отношения величины внутрислойного и межслойного обменного взаимодействия. В то же время значения критических индексов удовлетворяют скейлинговым соотношениям при значениях r вплоть до пороговой величины $r = 0,01$.

Автор признателен И.К. Камилу, К.Ш. Хизриеву, А.Б. Бабаеву, В.М. Уздину, Ю.Б. Кудасову за интерес к работе, постоянную помощь и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-02-16487) и Фонда содействия отечественной науке.

Список литературы

1. Паташинский А З, Покровский В Л *Флуктуационная теория фазовых переходов* 2-е изд. (М.: Наука, 1982)
2. Доценко В С *УФН* **165** 481 (1995)
3. Фольк Р, Головач Ю, Яворский Т *УФН* **173** 175 (2003)
4. Муртазаев А К, Камилу И К, Бабаев А Б *ЖЭТФ* **126** 1377 (2004)
5. Камилу И К, Муртазаев А К, Алиев Х К *УФН* **169** 773 (1999)
6. Wiseman S, Domany E *Phys. Rev. E* **58** 2938 (1998)
7. Ballesteros H G et al. *Phys. Rev. B* **58** 2740 (1998)
8. Васильев О А, Щур Л Н *ЖЭТФ* **117** 1110 (2000)
9. Harris A B J. *Phys. C: Solid State Phys.* **7** 1671 (1974)
10. Rüdte C et al. *Phys. Rev. B* **65** 220404 (2002)
11. Pärnaste M et al. *Phys. Rev. B* **71** 104426 (2005)
12. Wolff U *Phys. Rev. Lett.* **62** 361 (1989)
13. Fisher M E, Barber M N *Phys. Rev. Lett.* **28** 1516 (1972)
14. Birgeneau R J et al. *Phys. Rev. B* **27** 6747 (1983)
15. Прудников В В, Вакилов А Н *ЖЭТФ* **103** 962 (1993)
16. Heuer H-O J. *Phys. A: Math. Gen.* **26** L333 (1993)
17. Leiner V et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 37202 (2003)

PACS numbers: 78.70.Gq, 84.40.Fe, **84.47. + w**

Релятивистские многоволновые генераторы и их возможные применения

В.А. Черепенин

Настоящий доклад посвящен краткому обзору достижений в быстро развивающейся научной области — релятивистской высокочастотной электронике. Под релятивистской высокочастотной электроникой в настоящее время понимают ту часть вакуумной электроники, которая использует электронные пучки с энергией 0,2–100 МэВ и токами до 10^4 А. Мощность созданных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов достигает 10^9 – 10^{10} Вт при длительности импульса 10^{-9} – 10^{-7} с. Длины волн, освоенные в этой области, лежат в интервале от нескольких десятков сантиметров до значений видимого диапазона, т.е. перекрывают шесть порядков. Разумеется, семейство приборов, используемых в этих диапазонах, весьма разнообразно, однако оказывается, что многие из них хорошо известны в традиционной электронике СВЧ. В этом смысле представляет интерес развитие новых идей вакуумной электроники, направленных на повышение мощности генерируемого или усиливаемого сигнала и на переход в новые диапазоны длин волн. Этому аспекту релятивистской высокочастотной электроники и посвящен настоящий доклад. Отметим, что имеются прекрасные обзоры, посвященные релятивистской высокочастотной электронике и ее применению (см., например, [1]). Здесь мы попытаемся обратить внимание на те моменты развития этой области, которые по ряду причин не были подробно рассмотрены в упомянутых, а также других обзорах.

Первые вакуумные приборы — сеточные электронные лампы — появились еще в начале XX в. и, претерпев ряд модификаций, применяются до сих пор. Наиболее коротковолновые из них могут работать в дециметровом диапазоне длин волн. Мощность таких приборов может быть значительной, а некоторые другие их характеристики, например радиационная стойкость, позволяют надеяться на их применение несмотря на бурное развитие полупроводниковых приборов и в дальнейшем, по крайней мере в специальных приложениях. Физические принципы работы сеточных электронных ламп хорошо известны еще по школьным учебникам и не нуждаются в анализе. Отметим лишь сравнительно недавние идеи их использования для получения мощного излучения посредством включения множества таких приборов в линию передач. Вообще говоря, методы создания мощного прибора из многих меньшей мощности интенсивно разрабатываются и иногда с успехом. Последнее замечание относится, разумеется, к приборам любого типа.

В 1920–1940-е годы появились СВЧ-приборы нового типа, в которых принципиальное значение стали иметь "собственные" свойства электронного пучка: время пролета электронов через область взаимодействия, группировка электронов, пространственный заряд и т.д. Для их описания и конструирования было достаточно электродинамических представлений квазистационарной теории, таких, например, как теорема о наведенном токе, связанные линии передач и др. Именно в то время были изобретены и созданы вакуумные приборы, широко применяющиеся и сейчас. Достаточно назвать кли-

строны, лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ), магнетроны.

Первоначально работы в области микроволновой электроники, как правило, не связывались с собственным излучением заряженных частиц (обычно электронов), которое в прикладном аспекте изучалось в основном применительно к измерениям характеристик высокоэнергетичных частиц (черенковские счетчики, ускорители и т.д.). Однако уже в конце 1940-х годов появились идеи получения коротковолнового электромагнитного излучения с помощью релятивистских электронов за счет доплеровского преобразования частоты [2]. Величины токов пучков, полученных в то время, а следовательно, и концентрация рабочего вещества активной среды были невелики, поэтому для увеличения интенсивности излучения предлагалось осуществлять предварительную группировку электронов. Таким образом, спонтанное излучение сгустков электронов могло бы стать частично когерентным, если бы удалось обеспечить достаточно высокую концентрацию электронов в масштабах, много меньших рабочей длины волны. К сожалению, технические трудности на таком пути велики даже сейчас. Появление же в 1950-х годах мазеров и лазеров, использующих в качестве активного вещества возбужденные атомы или молекулы, в какой-то мере затормозило развитие высокочастотной релятивистской электроники, поскольку проблема получения когерентного коротковолнового излучения была решена. Современная полупроводниковая электроника успешно освоила также микроволновый и даже световой диапазоны длин волн. Тем не менее приборы с электронным пучком остались доминирующими в тех приложениях, где требуются большие мощности. Так, например, в радиолокации при мощностях генерации единичного прибора выше 1 кВт полупроводниковые приборы практически не применяются. Стремление увеличить мощности электронных приборов естественно привело к идеям релятивистской электроники, причем на новом этапе ее развития оказалось возможным формировать электронные пучки с токами, на много порядков превышающими ток пучков, использовавшихся в 1950-х годах. С помощью сильноточных электронных ускорителей прямого действия сейчас можно достаточно просто получать пригодные для генерации пучки с энергией электронов 0,1–2 МэВ и током 1–30 кА. Длительность импульса напряжения (а следовательно, и энергия пучка) может существенно изменяться в зависимости от типа ускорителя, составляя величины от нескольких сотен пикосекунд до нескольких микросекунд [3, 4]. Отметим, что потенциальные возможности сильноточных ускорителей по увеличению мощности весьма велики и реализованы современной релятивистской высокочастотной электроникой лишь в малой степени. Так, мощность сильноточных ускорителей доходит до 10^{13} Вт, тогда как мощность микроволновых генераторов не превышает 10^{10} Вт. Таким образом, релятивистская высокочастотная электроника — это прежде всего электроника больших (часто говорят сверхбольших) мощностей.

Другой особенностью релятивистской электроники является то, что в ней могут использоваться одни и те же принципы генерации как микроволн, так и существенно более коротковолновых электромагнитных колебаний, например световых. Так, предложенный еще в 1960-х годах СВЧ-прибор с криволинейным пучком,

формируемым периодически неоднородным магнитным полем, — убитрон — по принципу действия является прообразом современных лазеров на свободных электронах (ЛСЭ).

Необходимость генерации коротковолнового электромагнитного излучения с большой мощностью способствует развитию исследований релятивистских устройств с пространственно развитыми электродинамическими структурами. В нерелятивистской электронике пространственно развитые в направлении, поперечном поступательному движению электронов, приборы (например оротрон) скорее исключение, чем правило. Так, в оротроне высокооборотный квазиоптический резонатор обеспечивает лишь хорошую частотную стабильность генератора. Напротив, в исторически первом приборе релятивистской электроники с использованием принципиально релятивистских свойств электронного пучка — мазере на циклотронном резонансе (МЦР) (или его наиболее удачной модификации — гиротроне [5]) — увеличение поперечных размеров электродинамической структуры связано прежде всего с увеличением выходной мощности прибора.

Обычно при создании генератора или усилителя стремятся селективировать рабочую моду в "холодной" электродинамической структуре (без электронов), для того чтобы пучок, взаимодействуя с ней, генерировал когерентные одночастотные колебания [6]. При этом полагается, что электронный пучок слабо влияет на пространственную структуру электромагнитного поля. Конечно, полностью исключить такое влияние невозможно. В генераторах необходимо учитывать электронное смещение частоты, в усилителях электронная нагрузка может вообще привести к изменению характера взаимодействия, в особенности в черенковских приборах, работающих вблизи границы полосы прозрачности электродинамической структуры. Однако все эти эффекты принимаются во внимание при конструировании одномодовых (одноволновых) приборов лишь как поправки к основному режиму: усиленное поле в устройстве по пространственной структуре и частоте обычно почти не отличается от сигнала, подающегося на вход. В одномодовом генераторе так же, как и в усилителе, мода определяется прежде всего электродинамической структурой. Одномодовые приборы являются традиционными устройствами как нерелятивистской, так и релятивистской электроники.

При переходе к релятивистским скоростям электронов свойства электронного потока как активной среды изменяются. Специфика релятивистской электроники в одномодовых приборах проявляется лишь в увеличении оптимальной длины области взаимодействия $L \approx \lambda \gamma^2$ (λ — длина волны, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $\beta = v/c$, v — скорость частицы) и уменьшении оптимальной амплитуды $\alpha \approx 1/\gamma$ ($\alpha = eE/(mc\omega)$, $\omega = 2\pi c/\lambda$) высокочастотного поля E с увеличением энергии частиц $\varepsilon = mc^2$ [7]. Физический смысл такого изменения связан с увеличением так называемой продольной массы электрона. Однако для релятивистских электронов существенно меняется характер не только их движения, но и излучения. Это обстоятельство может быть использовано в многоволновых релятивистских источниках когерентного излучения.

При многоволновом взаимодействии, в отличие от одномодового (одноволнового), электронный пучок на фиксированной частоте взаимодействует сразу с не-

сколькими или многими модами электродинамической структуры. Спектр взаимодействующих мод может быть и непрерывным. Такой случай типичен для открытых электродинамических систем и свободного пространства. На выходе многоволнового прибора получается когерентная сумма взаимодействующих с электронным пучком мод. Частота излучения одна, как и в одномодовых приборах, поэтому такая смесь мод может быть эффективно преобразована в волновой пучок любой структуры, например в гауссов. Приведем некоторые элементарные соображения, поясняющие механизм действия многоволновых приборов.

В электронике СВЧ взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем связано с различными физическими механизмами. Можно, однако, выделить некоторые общие признаки, характеризующие СВЧ-устройства. Это, прежде всего, конечная длина области взаимодействия. В простейшем случае длина прибора определяется расстоянием между катодом и коллектором. Другим важным свойством является использование в системе условий синхронизма (резонанса) электромагнитного поля с электронным потоком, которые можно записать в следующем виде:

$$\omega - \mathbf{k}\mathbf{v} \approx n\Omega, \quad (1)$$

где ω — частота поля, $\mathbf{k}$ — волновой вектор, $\mathbf{v}$ — скорость электронов, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, Ω — характерная частота колебаний электронов, зависящая от механизма излучения. Например, при $\Omega = \omega_H \equiv \omega_0/\gamma$, $\omega_0 = eH_0/(mc)$ (γ — релятивистский фактор) реализуется магнитотормозное излучение; при $\Omega = (2\pi/l)v_{||}$, где $v_{||}$ — скорость поступательного движения электронов, l — период электродинамической структуры, — дифракционное, при $\Omega = (2\pi/l_H)v_{||}$, где l_H — период неоднородного магнитного поля, — ондуляторное и т.д. Легко видеть, что условие (1) относится, строго говоря, только к взаимодействию электронного пучка с плоскими электромагнитными волнами, для которых можно ввести понятие волнового вектора $\mathbf{k}$. Тем не менее его можно применять и для неоднородных волн, у которых изофазная поверхность является плоской, например для волноводных мод, так как соотношение (1) имеет фазовый (кинематический) характер. Как уже отмечалось, обычно в электронике СВЧ стремятся фиксировать направление и величину волнового вектора $\mathbf{k}$ посредством создания определенной электродинамической структуры. Пучок при этом взаимодействует с одной волной (модой). Такие системы естественно называть одноволновыми. К многоволновым мы будем относить устройства, в которых на фиксированной частоте электромагнитного поля электронный поток взаимодействует с несколькими распространяющимися однородными или неоднородными волнами. Одноволновому взаимодействию естественно поставить в соответствие понятие индуцированного излучения, так как согласно его определению квант индуцированного излучения не отличим по частоте и волновому вектору от падающего кванта. В многоволновых устройствах возможно излучение квантов с различными по направлению волновыми векторами, отличающимся от волнового вектора падающей волны (рис. 1). Поясним причины возникновения многоволновых задач на простейшем примере. Пусть на область существования электронного потока (область взаимо-

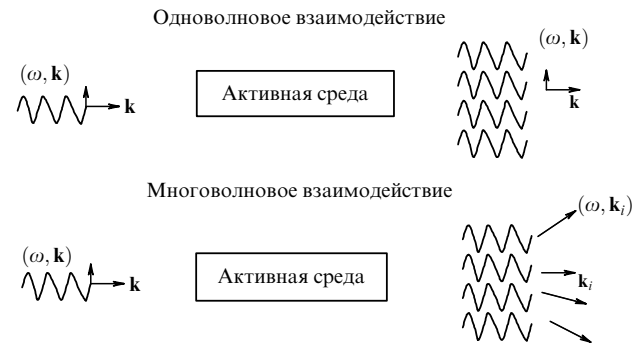


Рис. 1.

действия) падает плоская электромагнитная волна ($\mathbf{k}$, ω), тогда ширина углового спектра волн, рассеянных на частоте ω , определится из соотношения

$$\Delta k_i \Delta x_i \approx 1,$$

где Δk_i , Δx_i — проекции волнового вектора и размеров области взаимодействия на оси декартовой системы координат.

Таким образом, уже только ограниченность области взаимодействия обеспечивает конечную ширину углового спектра взаимодействующих волн. При выполнении определенных условий возможно усиление как падающего, так и рассеянного поля и на выходе соответствующего устройства формируется распределение поля с диаграммой направленности, существенно отличающейся от диаграммы поля на входе. Механизм усиления зависит от конкретной реализации системы и может быть классифицирован либо в соответствии с видом пучковой неустойчивости, либо с помощью соотношения (1). Как правило, в процессе взаимодействия с электромагнитными волнами электронный поток разбивается на сгустки, имеющие характерные размеры, меньшие длины излучаемой волны λ . Расстояние между сгустками в направлении преимущественно поступательного движения пучка в большинстве случаев составляет величину $\lambda_e = (2\pi/\omega)v_{||}$, называемую электронной длиной волны. Излучение электронов становится когерентным и происходит на частоте ω , а при достаточной группировке на гармониках $n\omega$ ($n = 1, 2, \dots$). Если на частотах гармоник не выполняется условие резонанса (1), то их излучение мало и физические процессы происходят только на частоте поля, подающегося на вход устройства. Электронный поток становится аналогичным антенне бегущей волны. Диаграмма направленности когерентного излучения электронов зависит при этом от формы пучка, времени (длины) существования сгустков и свойств излучения отдельных электронов, определяемых механизмом взаимодействия. Так, например, когерентное синхротронное излучение имеет узкую ("прожекторную") диаграмму. Многоволновые системы наиболее просто реализуются (по крайней мере принципиально) в усилительном режиме работы, возможно создание также многоволновых генераторов. Обратную связь можно осуществлять, подавая на вход устройства часть выходного излучения. Для одночастотного генератора в цепи обратной связи необходимо обеспечить селекцию мод. При достаточном усилении основная часть энергии

выходного излучения поступает на выход, минуя цепь обратной связи, что важно для создания мощных устройств.

Конечно, приведенные качественные соображения должны конкретизироваться при рассмотрении различных схем получения многоволнового когерентного излучения. Теоретически проанализированы уже практически все основные механизмы: черенковский, дифракционный, синхротронный, а также мазеры на нормальном и аномальном эффекте Доплера и др. [8]. Оказалось, что при существенно нелинейных режимах работы выходное излучение определяется собственным излучением сгустков электронов, образующихся в результате группирования. Кроме того, было показано, что многоволновые устройства имеют более высокий электронный к.п.д., чем одноволновые, поскольку при выходе из оптимального режима взаимодействия с одной волной электроны начинают взаимодействовать с другой.

В качестве наглядного методического примера приведем результаты исследования многоволнового устройства на синхротронном излучении [9].

Здесь взаимодействие происходит на криволинейном участке траектории электронов (рис. 2а). Если ток пучка сравнительно мал, то его когерентное излучение в направлениях, отличных от направления падающей волны невелико (рис. 2б). При увеличении тока коллективное излучение электронов почти не зависит от направ-

ления падающей волны и определяется характером группирования электронов (рис. 2в).

Приведем теперь последние результаты численного моделирования многоволнового черенковского генератора (МВЧГ), мощность которого остается рекордно высокой уже на протяжении почти 20 лет [10]. Схема МВЧГ показана на рис. 3.

Приведенные на рис. 3 значения размеров дают представление о масштабах экспериментального устройства. Поперечные размеры электродинамической структуры составляли $3-10\lambda$ в зависимости от рабочего диапазона длин волн — трехсантиметрового или восьмимиллиметрового. Толщина трубчатого электронного пучка была много меньше длины волны (около 1 мм). Период отрезков периодической структуры и высота элементов неоднородности выбирались таким образом, чтобы взаимодействие пучка и поля происходило вблизи коротковолновой границы полосы прозрачности (рис. 4).

На рисунке 4 показан механизм многоволнового взаимодействия в генераторах с поверхностными волнами. Прямые и обратные волны вблизи границы полосы прозрачности являются связанными и образуют колебания с конечной дифракционной добротностью, благодаря чему возможно возбуждение сразу нескольких мод.

Длина секций составляла величину порядка диаметра структуры, что обеспечивало взаимодействие электро-

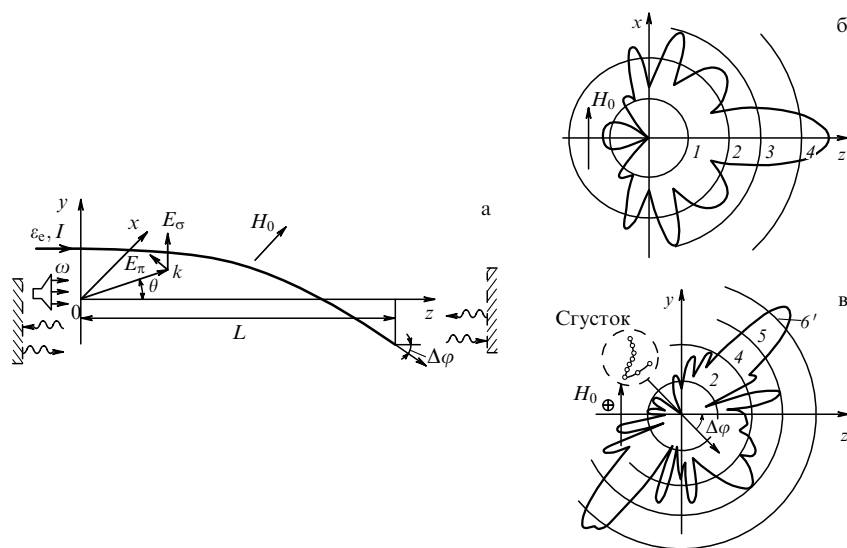


Рис. 2. (а) Схема взаимодействия. (б, в) Диаграммы направленности когерентного излучения пучка при малых (б) и больших (в) токах.

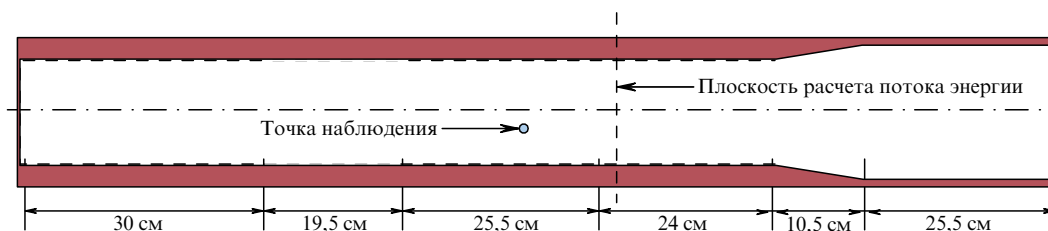


Рис. 3. Схема многоволнового черенковского генератора. Основные параметры электродинамической структуры: общая длина 135 см, диаметр 14 см, период 1,5 см, высота неоднородности 0,3 см, число периодов в первой секции 20, число периодов во второй секции 17. Характеристики электронного пучка: диаметр 9,8–12,0 см, напряжение 1,8–2,1 МВ, ток 20 кА, магнитное поле 19–21 кГс.

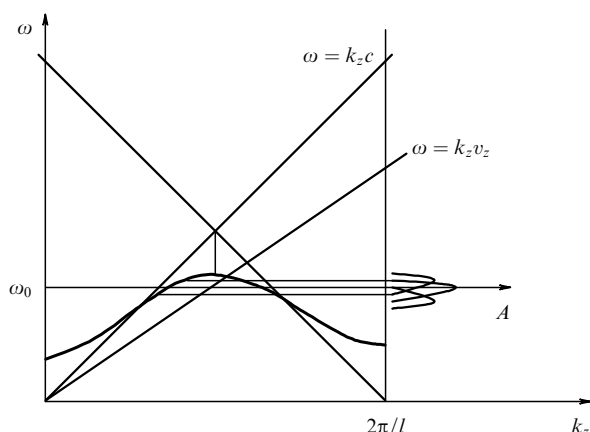


Рис. 4.

нов сразу с несколькими модами секций. Связь между секциями осуществляется дифракционным путем, через излучение электронных пучков.

До сих пор полного трехмерного численного анализа физических процессов в МВЧГ не проведено. Имеются лишь результаты использования двумерной и 2,5-мерной модели.

Некоторые результаты численного моделирования (полученные совместно с В.Н. Корниенко) представлены на рис. 5. Эти результаты подтвердили следующую картину взаимодействия. Распределение полей в продольном и поперечном направлениях соответствует многоволновому взаимодействию. Амплитуда синхрон-

ного с электронным потоком поля увеличивается к концу прибора, во второй секции. Одночастотная генерация устанавливается с помощью подбора параметров электродинамической системы и является достаточно устойчивой.

Отметим, что похожие схемы генераторов реализованы и на высших зонах полос пропускания периодических систем, например, в релятивистских дифракционных генераторах.

Эксперименты с МВЧГ были проведены еще в середине 1980-х годов в Институте сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН. Напряжение на диоде сильноточного ускорителя изменялось от 1,5 до 2,2 МВ. Ток составлял от 10 до 20 кА. Напряженность ведущего магнитного поля варьировалась от 15 до 30 кЭ. Подбором длины секций и параметров пучка удалось получить мощность 15 ГВт в трехсантиметровом диапазоне длин волн при электронном к.п.д. около 50 %. В миллиметровом диапазоне мощность достигала гигаваттного уровня. Экспериментально была проверена пространственная и временная когерентность МВЧГ, которая оказалась высокой и соответствовала спектру полученного радиоимпульса. Эти результаты до сих пор остаются непревзойденными.

В начале 1990-х годов интенсивная работа в этом направлении в России прекратилась, однако ее возобновление представляется возможным и практически важным в связи с развитием в последние годы работ по короткоимпульсной радиолокации, ускорению заряженных частиц, силовой радиоэлектронной борьбе, нетепловому воздействию мощных электромагнитных импуль-

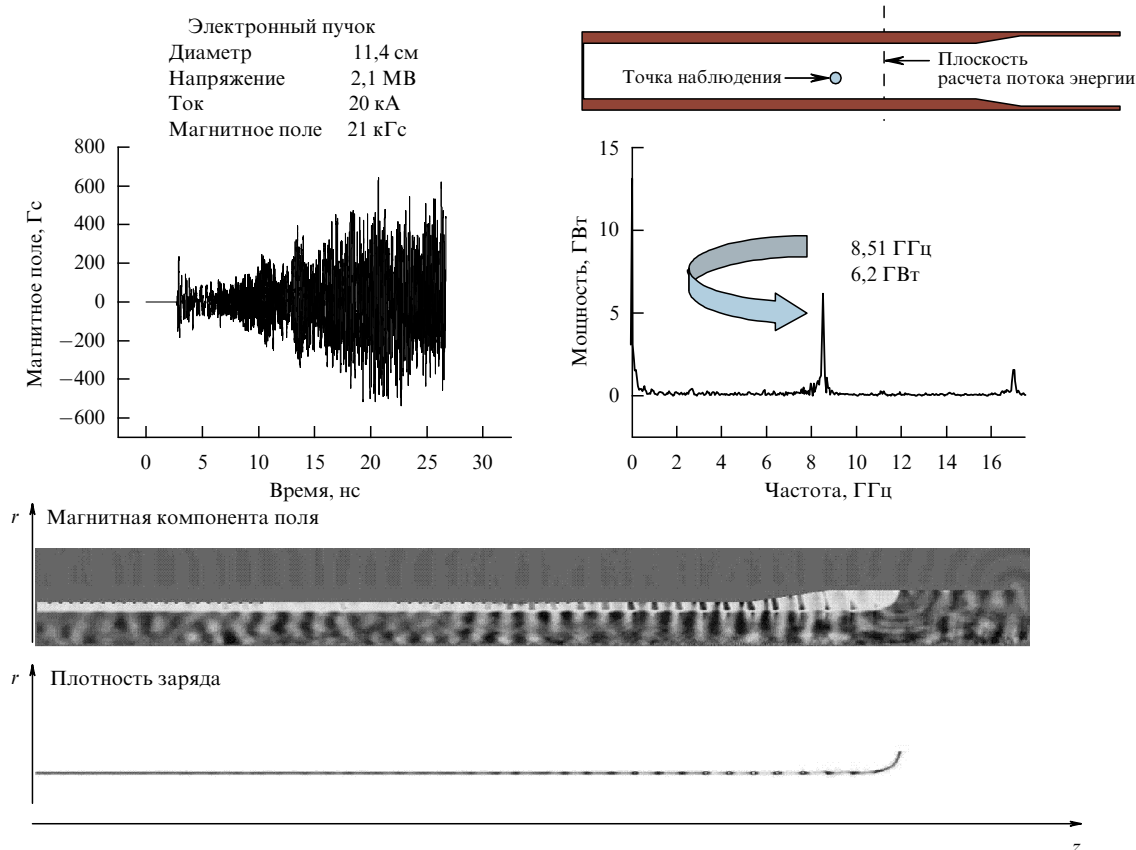


Рис. 5.

сов на естественные и искусственные среды и т.д. Рассмотрим кратко лишь последнее из перечисленных приложений.

Нетепловое воздействие электромагнитного излучения на различные среды исследуется уже сравнительно давно. Достаточно указать на работы по воздействию миллиметровых волн на точки акупунктуры на теле человека, результаты которых применяются в медицине [11]. Однако исследования по нетепловому воздействию мощных электромагнитных импульсов начались сравнительно недавно, в основном в результате развития релятивистской сильноточной электроники [12]. Можно отметить работы [13–16], связанные с биомедицинскими приложениями, в которых делались попытки использовать высокие значения напряженности электрического поля в микроволновых импульсах для воздействия на живые организмы. Однако эти пионерские работы не носили систематического характера и не привели пока к ощутимым результатам. Здесь мы рассмотрим результаты, касающиеся нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов на золотосодержащую горную породу [17–20].

Приведем некоторые соображения относительно постановки задачи. Золотосодержащую горную породу с электрофизической точки зрения можно представить как неоднородную смесь металлов, диэлектриков и полупроводников, в которой находятся небольшие (размером около 1 мкм) частицы золота. Современная технология извлечения золота на горно-обогатительных комбинатах использует растворение золота цианидами в предварительно измельченной на частицы размером до 50 мкм и менее горной породе. Однако степень извлечения золота сильно зависит от вида породы. Кроме того, существуют типы руд, называемые упорными рудами, из которых извлечение золота таким способом малопродуктивно и, следовательно, экономически невыгодно. Для отработанного сырья (хвостов) такая же ситуация. Целью воздействия является создание условий для эффективного извлечения золота.

В последнее время в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН и в Институте электрофизики (ИЭФ) Уральского отделения РАН ведутся исследования в этом направлении.

В работах ИЭФ [21] для дезинтеграции золотосодержащих пород используется гидроудар, образующийся при искровом пробое воды. Опыты проводятся в кювете с водой, где находится также взвесь руды при постоянном перемешивании. Для увеличения эффективности извлечения предложено использовать источник высокого напряжения наносекундной длительности. В отличие от работ ИЭФ в экспериментах, проводимых в ИРЭ совместно с Институтом проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН, специально создавались условия, при которых межэлектродный искровой пробой в сухой или немного смоченной золотосодержащей породе либо влиял слабо, либо совсем отсутствовал.

Дадим определение условий нетеплового воздействия мощных импульсов, а именно положим:

1) температура среды T практически не изменяется, $T_{\text{средн}}(\text{до взаимодействия}) \sim T_{\text{средн}}(\text{после взаимодействия})$;

2) амплитуда напряженности электрического поля импульса E много больше амплитуды статического пробоя среды, $E_{\text{макс. имп.}} \gg E_{\text{стат. проб.}}$;

3) длительность импульса Δt много меньше времени тепловой релаксации среды, $\Delta t \ll \Delta t_{\text{тепл. рел. ср.}}$.

Отметим, что часто под нетепловым воздействием электромагнитных колебаний понимается зависимость изменений, происходящих в среде, от напряженности электрического поля. Нам представляется, что предложенное здесь определение, с одной стороны, достаточно широко, а с другой, в большей мере соответствует физике нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов, согласно которой энергетический вклад практически не изменяет температуру как среды в целом, так и ее характерных сравнительно однородных элементов, подвергнутых такому воздействию. При этом, естественно, в течение короткого времени, много меньшего характерных времен установления теплофизических свойств материалов, составляющих среду, локальная температура в процессе воздействия может быть высокой.

Идея нетеплового воздействия мощными электромагнитными импульсами на золотосодержащую горную породу, предложенная Ю.В. Гуляевым, состоит в следующем. Действие электрического поля с высокой напряженностью в неоднородной смеси металлов полупроводников и диэлектриков приводит к возникновению целого семейства нелинейных эффектов: пондеромоторных сил, микропробоев вблизи неоднородностей и т.д., которые в той или иной степени способствуют дезинтеграции частиц золота и, следовательно, более эффективному их вымыванию цианидами.

Эти процессы крайне сложны и не изучены в достаточной степени, что в особенности касается их совместного действия. Приведенные ниже результаты, полученные экспериментальным путем исходя из этой довольно простой физической модели, еще нуждаются в детальном теоретическом описании.

Следует отметить, что частицы золота в руде весьма малы (≈ 1 мкм) и для воздействия можно использовать как видеоимпульсы, так и радиоимпульсы микроволнового диапазона. Эффективность применения той или иной формы импульсов зависит от технических условий применения рассматриваемого метода. Так, можно предположить, что применение радиоимпульсов будет эффективно при наличии промышленных образцов сверхмощных микроволновых генераторов (более 1 ГВт) с большим сроком службы (несколько десятков тысяч часов) и сравнительно высоким к.п.д. Такие приборы пока не созданы, хотя принципиальных трудностей их создания, по-видимому, не существует.

Таблица. Влияние воздействия мощных электромагнитных импульсов на извлечение золота и серебра цианированием из упорного гравитационного концентрата Неждановского месторождения (через разделитель "/") приведены значения для частиц размером 500 и 50 мкм соответственно)

Количество импульсов, $N \times 10^{-4}$	Извлечение A , %		Прирост извлечения ΔA , %	
	Золото	Серебро	Золото	Серебро
Без воздействия (базовый опыт)	51,2/77,0	21,8/43,2	—	—
1,75	70,7/80,6	42,1/76,3	19,5/3,6	20,3/33,1
2,50	81,8/84,0	65,5/68,7	30,6/7,0	43,7/25,5
3,75	82,3/83,4	68,9/73,7	31,1/6,4	47,1/30,5

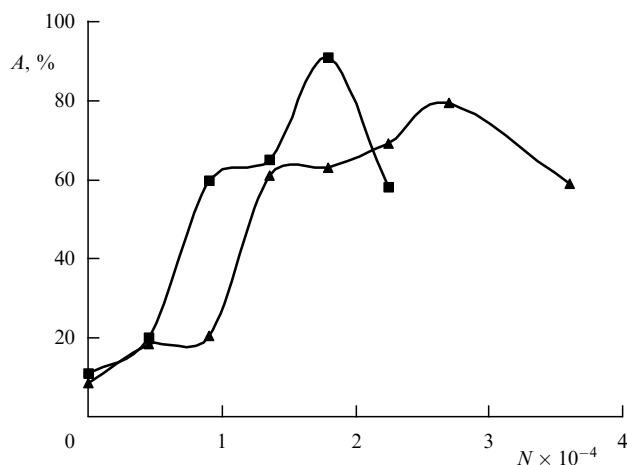


Рис. 6.

В таблице приведены результаты нетеплового воздействия мощных электромагнитных видеоимпульсов на упорную золотосодержащую руду. Отметим, что сравнительно небольшое число необходимых видеоимпульсов легко реализуется одним или несколькими радиоимпульсами.

На рисунке 6 представлены результаты нетеплового воздействия на золотосодержащие хвосты двух горнообогатительных комбинатов. Выход золота увеличился почти в 10 раз.

Таким образом, применение мощной релятивистской электроники, в том числе многоволновой, вполне возможно и в невоенных областях.

Список литературы

1. Gaponov-Grekhov A V, Granatstein V L (Eds) *Applications of High-Power Microwaves* (Boston: Artech House, 1994)
2. Гинзбург В Л *ДАН СССР* **56** 253 (1947)
3. Месяц Г А, Яландин М И *УФН* **175** 225 (2005)
4. Месяц Г А *Генерирование мощных наносекундных импульсов* (М.: Сов. радио, 1974)
5. Gaponov A V et al. *Int. J. Electron.* **51** 277 (1982)
6. Ковалев Н Ф и др. *Письма в ЖЭТФ* **18** 232 (1973)
7. Петелин М И *Изв. вузов. Сер. Радиофиз.* **13** 1586 (1970)
8. Бугаев С П и др. *Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы* (Отв. ред. П М Щанин) (Новосибирск: Наука, 1991)
9. Канавец В И, Корженевский А В, Черепенин В А *ЖТФ* **54** 541 (1984)
10. Бугаев С П и др. *Письма в ЖТФ* **9** 1385 (1983); *Радиотехника и электроника* **32** 1488 (1987)
11. *Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения низкой интенсивности* (Под ред. Н Д Девяткова) (М.: ИРЭ АН СССР, 1985)
12. Месяц Г А *Этоны* Ч. 3 (Екатеринбург: УИФ Наука, 1993)
13. Девятков Н Д и др. *Биофизика* **28** 552 (1982)
14. Девятков Н Д и др. *Докл. РАН* **336** 826 (1994)
15. Девятков Н Д и др. *Биомедицинская радиоэлектроника* (10) 29 (2000)
16. Большаков М А и др. *Докл. РАН* **371** 691 (2000)
17. Чантурия В А и др. *Докл. РАН* (5) **355** (1999)
18. Чантурия В А и др. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых* (4) 95 (2001)
19. Чантурия В А и др. *Докл. РАН* **379** 372 (2001)
20. Бунин И Ж и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **65** 1788 (2001)
21. Котов Ю А и др. *Докл. РАН* **372** 654 (2000)