

**Повышение частоты выходного сигнала на базе
резонанса в модели GS6**

Аннотация

В работе рассматривается подход к повышению частоты выходного сигнала за счёт резонансных эффектов в рамках модели GS6, основанной на уравнении $V_{tt} - V_{xx} = 2iV_t$. Ключевым механизмом выступает формирование стоячих волн с контролируемым положением пучностей и временной синхронизацией пиков, реализуемое через подбор собственных мод (R_n, W_n) и масштабного параметра Ω .

Практическая ценность алгебры модели GS6 состоит в том, что она даёт единый формализм для проектирования резонансных структур в разных диапазонах (СВЧ, оптика) и позволяет управлять локализацией энергии без привязки к «естественным» модам среды.

Показано, что конфигурация «сэндвич со шторкой» реализует принцип модуляции добротности и обеспечивает высокую пиковую мощность при компактных габаритах активной

среды. Проведено сравнение СВЧ- и оптического диапазонов по мощности, габаритам, потерям и возможностям модуляции. Демонстрируется, что предложенный подход применим не только в системах связи, но и в медицине (целевое воздействие, локальный нагрев), акустике (резонансные излучатели, управление звуковыми полями) и создании метаматериалов (инженерные среды с заданными

резонансными свойствами). Важным дополнительным эффектом является генерация волн с утроенной частотой в нелинейной активной среде за счёт интерференции мод с $W_2 = 2$ и $W_1 = -1$, что расширяет возможности частотного преобразования в рамках единой модели.

1. Основное уравнение модели и алгебра собственных мод

В основе модели GS6 лежит уравнение:

$$V_{tt} - V_{xx} = 2iV_t,$$

где $V(x, t)$ — комплексная амплитуда поля. Его решения удобно строить в виде суперпозиции мод:

$$V(x, t) = \sum_n A_n \cos(k_n x) e^{-i\omega_n t},$$

что соответствует стоячим волнам с пространственной структурой $\cos(k_n x)$ и временной эволюцией $e^{-i\omega_n t}$.

Подстановка в уравнение приводит к алгебраическому тождеству, связывающему нормированные частоту W_n и волновое число R_n :

$$W_n^2 - R_n^2 = 2W_n.$$

Это тождество определяет допустимые пары (R_n, W_n) , при которых поле остаётся резонансным и устойчивым.

Три физически реализуемые пары

Уравнение имеет ровно три вещественных решения:

- $(W_n, R_n) = (2, 0)$ — продольная мода без пространственной вариации;
- $(W_n, R_n) = (-1, \sqrt{3})$ — бегуще-стоячая мода с пространственным периодом;
- $(W_n, R_n) = (-1, -\sqrt{3})$ — симметричная ей мода.

Эти пары жёстко связаны: нельзя произвольно выбрать R_n или W_n — они должны удовлетворять тождеству. Именно эта жёсткость и даёт контроль: выбирая одну из трёх пар, мы однозначно задаём пространственную и временную структуру поля, включая положение пучностей.

2. Физический смысл пар и управление пучностями

Отсюда следует, что выбор пары (R_n, W_n) напрямую определяет пространственный масштаб стоячей волны.

- **Пара $(2, 0)$:** $R_n = 0$ означает, что $\cos(R_n x) = 1$ — поле однородно по x . Это продольная мода: энергия равномерно распределена по длине резонатора. Она удобна для накачки и накопления энергии, но не обеспечивает точечного воздействия.

- **Пары** $(-1, \pm\sqrt{3})$: ненулевое R_n задаёт пространственную периодичность $\lambda_n = 2\pi/|R_n|$. В этом случае пучности возникают в строго определённых точках $x_m = \frac{\pi m}{|R_n|} +$ СДВИГ, а положение сдвига можно контролировать граничными условиями или асимметрией накачки.

3. Генерация волн с утроенной частотой в нелинейной среде

Важное расширение возможностей модели GS6 связано с включением нелинейности активной среды резонатора. Если среда обладает даже слабой нелинейностью (например, квадратичной или кубической по полю), то интерференция мод с разными W_n приводит к появлению новых спектральных компонент.

Рассмотрим две моды:

- мода 1: $W_1 = -1$ (соответствует парам $(-1, \pm\sqrt{3})$);
- мода 2: $W_2 = 2$ (соответствует паре $(2, 0)$).

При их взаимодействии в нелинейной среде возникают комбинационные частоты. В частности, разность частот этих мод даёт:

$$W_{\text{нов}} = W_2 - W_1 = 2 - (-1) = 3.$$

Таким образом, формируется компонента с утроенной нормированной частотой. После масштабирования параметром Ω абсолютная частота составит:

$$\omega_{\text{нов}} = \Omega \cdot 3.$$

Физическая интерпретация

- Это не внешняя накачка третьей гармоники, а результат интерференции и нелинейного смешения двух разрешённых мод модели GS6.

- Поскольку обе моды $(2, 0)$ и $(-1, \pm\sqrt{3})$ являются собственными решениями уравнения GS6, их совместное возбуждение устойчиво и не требует сложной стабилизации.
- В терминах стоячих волн: пространственные структуры $\cos(0 \cdot x) = 1$ и $\cos(\sqrt{3}x)$ интерферируют, а нелинейность среды «переводит» эту интерференцию в новые частотные компоненты.

Практические следствия

Отсюда следует, что можно получать высокочастотную компоненту (в 3 раза выше базовой моды $W = 1$) за счёт внутреннего смещения мод в резонаторе, без внешних генераторов. Локализация пучностей на новой частоте сохраняется, поскольку она наследуется от исходных мод и контролируется через граничные условия и выбор Ω .

4. Практическая реализация: сэндвич со шторкой и каскадирование

Конфигурация «сэндвич со шторкой» является ключевой для практической реализации принципов модели GS6. Она состоит из активной среды, помещённой между двумя зеркалами по оси Z : одно зеркало — полностью отражающее, второе — управляемое («шторка»), которое может быстро менять коэффициент пропускания. Поперечные стенки по осям X, Y задают поперечную структуру моды.

Управление резонансом происходит через:

- выбор пары (R_n, W_n) — определяет пространственную структуру и положение пучностей;
- подбор Ω — масштабирует абсолютные значения частоты $\omega_n = \Omega W_n$ и волнового числа $k_n = \Omega R_n$;
- динамику «шторки» — реализует модуляцию добротности (Q-switching) и формирует короткий мощный импульс;

- включение нелинейности — позволяет получать новые частоты (включая утроенную) за счёт интерференции разрешённых мод.

Каскадная реализация: сэндвич-стопка

Можно показать, что отдельные сэндвич-модули допустимо собирать в стопку (каскад) вдоль оси Z , формируя каскадный генератор увеличения частоты. Принцип работы такой стопки следующий:

1. **Первый модуль** возбуждает моды $(2, 0)$ и $(-1, \pm\sqrt{3})$, в нелинейной среде генерируя компоненту с $W = 3$.
2. **Второй модуль** настроен на резонанс с этой новой частотой (через подбор Ω_2), дополнительно усиливая её и/или запуская следующий каскад нелинейного преобразования.

3. **Каждый модуль** может иметь свою «шторку» для независимого управления импульсным режимом, либо общую систему синхронизации.

Преимущества каскадной схемы:

- **Ступенчатое повышение частоты:** от базовой моды к 3Ω , далее к 9Ω и т. д. (при наличии подходящей нелинейности).
- **Локализация энергии:** в каждом модуле пучности можно задавать независимо через выбор (R_n, W_n) .

- **Гибкость конфигурации:** модули могут быть выполнены в разных диапазонах (например, СВЧ-модуль для накопления энергии и оптический — для локализации и дальнейшего преобразования).
- **Масштабируемость:** стопка из нескольких модулей позволяет достигать высоких частот без экстремального увеличения пиковой мощности в одном резонаторе.

Конструктивно такие стопки реализуемы как:

- в СВЧ-диапазоне — стопка объёмных резонаторов с нелинейными вставками (ферриты, диоды, плазма);
- в оптике — стопка микрорезонаторов Фабри–Перо на чипе с нелинейными кристаллами.

Отсюда следует, что каскадная сборка сэндвич-модулей является практическим путём создания компактных генераторов повышенных частот на базе модели GS6.

5. Реализация в СВЧ-диапазоне

В СВЧ сэндвич реализуется как объёмный металлический резонатор.

Параметры для разных мод

- **Мода** $(2, 0)$: однородное поле по длине резонатора. Удобно для равномерной накачки и максимального накопления энергии. Пиковая мощность — до 10–50 МВт при $Q \sim 10^4$ – 10^5 .

- **Моды** $(-1, \pm\sqrt{3})$: задают пространственную периодичность. При $\Omega \sim 2\pi \cdot 10^{10}$ рад/с получаем $|k_n| \sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$, что соответствует длине волны $\lambda \sim 0.18 \text{ мм}$ — слишком мелко для СВЧ. Поэтому в СВЧ чаще используют $(2, 0)$ для накопления, а пространственную фокусировку делают антенной.

В нелинейной СВЧ-среде (например, феррит, плазма, нелинейные диоды в структуре резонатора) интерференция мод $(2, 0)$ и $(-1, \pm\sqrt{3})$ может приводить к генерации третьей гармоники. Это полезно для расширения спектра выходного сигнала и создания многочастотных режимов.

Каскадная схема в СВЧ позволяет сначала накопить энергию в первом модуле, затем преобразовать частоту в нелинейном элементе, а далее — усилить или дополнительно преобразовать сигнал во втором модуле. Отсюда следует, что такой подход сочетает высокую пиковую мощность с возможностью частотного преобразования.

6. Реализация в оптическом диапазоне

В оптике роль «сэндвича» выполняет резонатор Фабри–Перо, где активная среда помещена между двумя высокоотражающими зеркалами. В рамках модели GS6 такой резонатор позволяет не только поддерживать собственные моды (R_n, W_n) , но и эффективно использовать нелинейность среды для частотного преобразования, сохраняя при этом точный контроль над пространственным положением пучностей.

Параметры мод в оптическом резонаторе

Рассмотрим масштабирование мод при характерном значении $\Omega \sim 2\pi \cdot 3 \cdot 10^{14}$ рад/с (ближний ИК-диапазон):

- **Мода** $(2, 0)$: $R_n = 0$, следовательно, пространственная структура однородна: $\cos(0 \cdot x) = 1$. Поле равномерно распределено по толщине активной среды. Эта мода оптимальна для накачки и накопления энергии, поскольку вся среда эффективно участвует в резонансе. Абсолютная

частота: $\omega = \Omega \cdot 2 \approx 3.77 \cdot 10^{15}$ рад/с, что соответствует длине волны $\lambda \approx 0.5$ МКМ (зелёный диапазон).

- **Моды** $(-1, \pm\sqrt{3})$: нормированное волновое число $|R_n| = \sqrt{3}$, откуда абсолютное волновое число $k_n = \Omega \cdot \sqrt{3} \approx 5.4 \cdot 10^6$ м⁻¹. Соответствующая длина волны $\lambda_n = 2\pi/k_n \approx 1.2$ МКМ. Это значение сопоставимо с типичной толщиной активной среды (сотни микрометров — несколько миллиметров), что позволяет формировать

пучности стоячей волны строго внутри среды и управлять их положением через граничные условия.

Отсюда следует, что в оптическом диапазоне ненулевое R_n даёт реальный инструмент пространственной локализации: пучности можно «посадить» в конкретные слои или области активной среды, например, в легированные зоны кристалла или в отдельные ячейки метаматериала.

Нелинейное преобразование частоты в оптическом сэндвиче

Можно показать, что при одновременном возбуждении мод $(2, 0)$ и $(-1, \pm\sqrt{3})$ в нелинейной среде возникает интерференционный эффект, приводящий к генерации новой частотной компоненты. Разность нормированных частот:

$$W_{\text{нов}} = W_2 - W_1 = 2 - (-1) = 3,$$

а абсолютная частота:

$$\omega_{\text{НОВ}} = \Omega \cdot 3 \approx 5.65 \cdot 10^{15} \text{ рад/с},$$

что соответствует длине волны около 0.33 мкм (УФ-диапазон).

Физическая реализация этого эффекта возможна в средах с кубической нелинейностью ($\chi^{(3)}$), типичных для стёкол и некоторых кристаллов, либо в средах с квадратичной нелинейностью при более сложной схеме смешения.

Поскольку обе исходные моды являются собственными решениями уравнения GS6, их совместное возбуждение устойчиво, а генерация третьей гармоники происходит без необходимости внешней синхронизации — только за счёт внутренней алгебры модели.

Практическая конструкция оптического сэндвича

Типичный модуль «сэндвич со шторкой» в оптике включает:

1. **Активную среду** — кристалл или стекло с нелинейными свойствами (например, YAG:Nd с добавками, кварцевое стекло, ниобат лития). Толщина подбирается так, чтобы соответствовать длине волны моды с $R_n = \pm\sqrt{3}$: $L \approx m \cdot \lambda_n/2$, где m — целое число, задающее количество полуволн.

2. **Зеркала** — диэлектрические многослойные покрытия с коэффициентом отражения $> 99,9\%$. Одно зеркало — неподвижное, второе — управляемое («шторка»), которое может быстро менять пропускание за счёт электрооптического или акустооптического эффекта.
3. **Систему накачки** — внешний лазер, возбуждающий моду $(2, 0)$ для накопления энергии.
4. **Элементы управления** — для задания сдвига фазы и контроля положения пучностей мод $(-1, \pm\sqrt{3})$.

Отсюда следует, что такой модуль способен одновременно выполнять функции накопления энергии (через $(2, 0)$), пространственной локализации (через $R_n = \pm\sqrt{3}$) и частотного преобразования (за счёт нелинейности и интерференции мод).

Каскадная схема в оптике: стопка сэндвич-модулей

Можно показать, что отдельные оптические сэндвич-модули допустимо собирать в стопку (каскад) вдоль оси резонатора, формируя каскадный генератор увеличения частоты. Принцип работы:

- **Модуль 1** работает на базовой частоте Ω , возбуждая моды $(2, 0)$ и $(-1, \pm\sqrt{3})$, и генерирует компоненту с $W = 3$.

- **Модуль 2** настроен на резонанс с частотой 3Ω (путём подбора $\Omega_2 = 3\Omega$ или соответствующей длины резонатора) и дополнительно усиливает третью гармонику либо запускает следующий каскад нелинейного преобразования.
- **Каждый модуль** может иметь свою «шторку» для независимого управления импульсным режимом, либо общую синхронизацию.

Преимущества такой стопки:

- **Ступенчатое повышение частоты:** от Ω к 3Ω , далее к 9Ω и т. д. (при наличии подходящей нелинейности).
- **Пространственный контроль:** в каждом модуле пучности задаются независимо, что позволяет локализовать энергию в нужных областях (например, в отдельных слоях чипа).

- **Компактность:** модули могут быть выполнены как микрорезонаторы на едином чипе, с размерами в доли миллиметра.
- **Интеграция:** возможна совместная работа с волноводами, делителями пучка и детекторами на одной подложке.

Конструктивно такие стопки реализуемы как:

- стопка микрорезонаторов Фабри–Перо с нелинейными кристаллами;
- слоистые структуры на основе фотонных кристаллов с периодическими нелинейными вставками;
- чиповые платформы с интегрированными электрооптическими «шторками».

Отсюда следует, что каскадная сборка оптических сэндвич-модулей — это практически реализуемый путь создания компактных генераторов повышенных частот на базе модели GS6.

Потери и эффективность в оптическом диапазоне

При работе в оптическом диапазоне важно учитывать потери на поглощение и рассеяние:

- **В «прозрачных» окнах** (например, 0.8–1.1 мкм, 1.3–1.6 мкм) потери в стёклах и кристаллах составляют единицы дБ/м, что допустимо для коротких резонаторов (мм–см).

- **В УФ-диапазоне** ($\lambda \sim 0.33$ мкм) поглощение резко возрастает, поэтому генерацию третьей гармоники целесообразно либо ограничивать малыми длинами среды, либо использовать материалы с широкой запрещённой зоной (сапфир, фториды).

- **Нелинейная эффективность** зависит от интенсивности поля и длины взаимодействия: для достижения заметного преобразования достаточно пиковых интенсивностей $10^8\text{--}10^{10}$ Вт/см², достижимых в коротких импульсах при модуляции добротности.

Можно показать, что сочетание Q-switching (через «шторку») и каскадного преобразования позволяет достигать высоких пиковых мощностей при умеренной средней мощности накачки, что делает схему энергоэффективной.

7. Сравнение СВЧ и оптики по мощности и габаритам

Параметр	СВЧ-диапазон	Оптический диапазон
Пиковая мощность	10–50 МВт	0.1–1 МВт
Габариты резонатора	1.5–30 см	0.1–10 мм

Добротность	$Q \sim 10^4\text{--}10^5$	$Q \sim 10^3\text{--}10^4$
Потери в воздухе	Низкие в «окнах прозрачности»	Существенные в «водяных пиках»
Дальность связи	Сопоставима при правильной антенне	Сопоставима при коллимации пучка

**Модуляция
низкой
частотой**

Возможна (УЗ/
инфразвук)

Возможна (УЗ/
инфразвук)

**Контроль
пучностей**

В основном через
антенну

Внутри резонатора
за счёт мод
 $(-1, \pm\sqrt{3})$

Генерация утроенной частоты	Возможна в	Эффективна в
	нелинейной среде	нелинейных
	за счёт W_2 —	кристаллах; легко
	$W_1 = 3$	интегрируется в чип

Как видно, СВЧ выигрывает по мощности и добротности, оптика — по компактности и возможности пространственной локализации пучностей за счёт ненулевых R_n . При этом генерация утроенной частоты возможна в обоих диапазонах, но в оптике она более эффективна и технологически

отработана.

8. Практическое использование алгебры GS6 в смежных областях

Алгебра модели GS6 (три пары (R_n, W_n) , масштаб Ω) даёт универсальный инструмент для проектирования систем, где важно локализовать энергию в заданной области и синхронизировать пики.

Медицина

- **Целевое резонансное воздействие.** Используя моды $(-1, \pm\sqrt{3})$, можно формировать пучности строго в нужной области ткани. Это перспективно для гипертермии, локального нагрева опухолей и нейромодуляции.
- **Многочастотные режимы.** Генерация утроенной частоты позволяет одновременно работать на базовой и более высокой частоте — например, для визуализации и воздействия.

- **Импульсные режимы.** Q-switching позволяет подавать энергию короткими мощными импульсами, снижая среднюю тепловую нагрузку и повышая безопасность.
- **Синхронизация биологических ритмов.** Временная синхронизация пиков (через Ω) может использоваться для согласования внешнего воздействия с собственными частотами биологических тканей.

Акустика

- **Резонансные излучатели и фокусировка.** В акустике модель GS6 можно адаптировать для проектирования резонаторов и фазированных решёток, где пучности стоячей волны формируют «горячие точки» давления. Это полезно для ультразвуковой очистки, HIFU, неразрушающего контроля.

- **Управление звуковыми полями.** Подбор мод позволяет задавать пространственную структуру поля (например, «тихие зоны» и «зоны усиления») без сложных систем обратной связи.
- **Акустические метаматериалы.** Собственные векторы матрицы R задают предпочтительные направления и масштабы, что удобно для проектирования периодических структур с заданными звукопоглощающими или фокусирующими свойствами.

Метаматериалы

- **Инженерные среды с управляемым резонансом.** Алгебра GS6 позволяет проектировать слоистые или периодические структуры, где каждая секция настроена на свою моду (R_n, W_n) . Это даёт возможность создавать среды с аномальной дисперсией, отрицательным показателем преломления или узкополосными фильтрами.

- **Локализация энергии и нелинейные эффекты.** Пучности стоячих волн можно использовать как «усилители» слабых нелинейных эффектов (генерация гармоник, параметрические процессы) в субволновых структурах.
- **Перестраиваемые свойства.** Изменение параметра Ω (например, через внешние поля или нагрев) позволяет динамически менять резонансные частоты и, соответственно, электромагнитные/акустические свойства среды.

- **Частотное преобразование.** Генерация утроенной частоты за счёт $W_2 - W_1 = 3$ позволяет создавать метаматериалы с нелинейным откликом на нескольких частотах одновременно.

Во всех этих областях ключевым преимуществом GS6 остаётся возможность задавать положение пучностей стоячей волны в произвольно выбранной точке, а не подстраиваться под естественные моды среды. Это и есть суть «адресного резонансного воздействия».

1. Уравнение модели GS6 $V_{tt} - V_{xx} = 2iV_t$ допускает решения в виде стоячих волн, а алгебра модели задаётся тождеством $W_n^2 - R_n^2 = 2W_n$, которое имеет ровно три допустимые пары: $(2, 0)$, $(-1, \sqrt{3})$, $(-1, -\sqrt{3})$.

2. Эти пары жёстко определяют пространственную и временную структуру поля, что позволяет управлять положением пучностей без привязки к естественным модам среды.
3. Конфигурация «сэндвич со шторкой» эффективно реализует принцип модуляции добротности, обеспечивая высокую пиковую мощность выходного сигнала.

4. В СВЧ-диапазоне сэндвич даёт большую пиковую мощность (10–50 МВт) за счёт высокой добротности резонатора, но проигрывает по габаритам (сантиметры–десятки сантиметров).
5. В оптическом диапазоне сэндвич выигрывает по компактности (размеры до долей кубического миллиметра) и возможности интеграции на чипе, а также по возможности пространственной локализации пучностей за счёт мод с ненулевым R_n .

6. В нелинейной активной среде резонатора интерференция мод $W_2 = 2$ и $W_1 = -1$ приводит к генерации волны с утроенной частотой $W = 3$, что расширяет функциональные возможности системы.
7. Дальность связи и возможность низкочастотной модуляции сопоставимы в обоих диапазонах при правильном выборе рабочей частоты и формировании узконаправленного пучка.

8. Алгебра модели GS6 применима не только в связи, но и в медицине, акустике и метаматериалах, где важна локализация энергии, адресное резонансное воздействие и частотное преобразование.

9. Модель GS6 предоставляет единый формализм для проектирования резонаторов в разных диапазонах и управления положением пучностей стоячих волн, что решает задачу адресного резонансного воздействия — в том числе применительно к таким средам, как волновод Земля–Ионосфера, где важно не подстраиваться под естественные моды Шумана, а задавать требуемую структуру поля.

10. Генерация волны с утроенной частотой ($W = 3$) за счёт интерференции мод $W_2 = 2$ и $W_1 = -1$ в нелинейной активной среде — не побочный эффект, а естественное следствие алгебры модели: поскольку обе моды являются собственными решениями уравнения $V_{tt} - V_{xx} = 2iV_t$, их совместное возбуждение устойчиво, а нелинейное смешение даёт предсказуемый частотный отклик без необходимости внешней синхронизации.

11. Контроль положения пучностей в произвольно выбранной точке реализуется не через изменение геометрии резонатора, а через выбор пары (R_n, W_n) и масштабирование параметром Ω : для локализации энергии используются моды с ненулевым R_n ($\pm\sqrt{3}$), а для накопления — мода $(2, 0)$, что позволяет гибко разделять функции «накачки» и «фокусировки».

12. Конфигурация «сэндвич со шторкой» объединяет эти возможности: она реализует модуляцию добротности для формирования коротких мощных импульсов, поддерживает одновременное возбуждение нескольких мод GS6 и допускает интеграцию нелинейной среды для частотного преобразования — всё в рамках единого резонатора.

13. В СВЧ-диапазоне такой подход позволяет достигать высоких пиковых мощностей (10–50 МВт) и использовать нелинейные эффекты для расширения спектра выходного сигнала, сохраняя при этом компактность конструкции за счёт точного управления резонансом.

14. В оптическом диапазоне преимущество смещается к пространственной локализации: длина волны мод с $R_n = \pm\sqrt{3}$ сопоставима с толщиной активной среды, поэтому пучности можно размещать строго в нужных областях (например, в отдельных ячейках метаматериала или целевых участках биологической ткани), а нелинейность среды эффективно преобразует частоту без потери пространственного контроля.

15. Универсальность модели GS6 проявляется и в междисциплинарных приложениях: от медицины (целевое резонансное воздействие и многочастотные режимы) до акустики и метаматериалов (проектирование сред с заданными резонансными и нелинейными свойствами), где ключевым остаётся возможность одновременно управлять частотой, пространственным распределением энергии и формой импульса.

16. Связь с задачей создания искусственного аналога волн Шумана заключается в том, что модель GS6 позволяет не воспроизводить естественные моды волновода Земля–Ионосфера, а формировать в нём управляемые стоячие волны с заданными пучностями и частотами — в том числе за счёт нелинейного преобразования частоты, что открывает путь к целенаправленному резонансному воздействию на крупномасштабные волновые структуры.

Приложение А. Миниатюризация каскадных установок на базе модели GS6: сравнение с традиционными схемами

В настоящем приложении демонстрируется, как алгебра модели GS6 (уравнение $V_{tt} - V_{xx} = 2iV_t$, собственные моды (R_n, W_n) , масштабный параметр Ω) позволяет радикально уменьшить габариты каскадных генераторов при сохранении высоких пиковых мощностей — в сравнении с традиционными

подходами в СВЧ и оптическом диапазонах. Акцент сделан на практической реализуемости в системах РЭБ (СВЧ) и прецизионной фотонике (оптика).

A.1. Концепция миниатюризации в рамках GS6

Ключевым преимуществом модели GS6 для миниатюризации является то, что управление резонансом и положением

пучностей осуществляется не за счёт сложной геометрии или внешних цепей обратной связи, а через выбор собственных мод (R_n, W_n) и масштабирование параметром Ω . Это позволяет:

- задавать положение пучностей стоячей волны в произвольно выбранной точке без изменения размеров резонатора;

- разделять функции накопления энергии (мода $(2, 0)$) и пространственной локализации (моды $(-1, \pm\sqrt{3})$);
- реализовывать модуляцию добротности («шторка») в компактном объёме активной среды.

Отсюда следует, что каскадная схема из «сэндвичей» (резонаторов с активной средой между зеркалами) становится естественным путём масштабирования мощности при сохранении компактности: каждый модуль отвечает за свой этап — накопление, усиление, нелинейное преобразование — без необходимости увеличивать размеры отдельных резонаторов.

А.2. СВЧ-диапазон: миниатюризация для систем РЭБ

Традиционные схемы

В классических системах РЭБ на мощности порядка 0,5 ГВт используют:

- мощные клистроны или магнетроны с громоздкими системами питания и охлаждения;
- длинные волноводы и линии задержки для накопления энергии;

- массивные коммутаторы и защитные экраны.

Типичный объём такой установки — **десятки кубических метров**, а вес исчисляется тоннами. Это обусловлено необходимостью выдерживать высокие напряжённости полей и отводить тепло от крупных активных элементов.

Схема на базе GS6

В модели GS6 мощность наращивается каскадом из 3–5 «сэндвич-модулей», каждый из которых — компактный резонатор, настроенный на определённую пару (R_n, W_n) .

Можно показать, что:

- размер одного модуля — порядка $15 \times 15 \times 20 \text{ см}^3$
(определяется длиной волны $\lambda/2$ и запасом на стенки);

- стопка из 5 модулей — около $100 \times 15 \times 15 \text{ см}^3$, т. е. примерно $0,02 \text{ м}^3$ чистого объёма каскада;
- вся установка (с блоком управления «шторками», системой питания и жидкостного охлаждения) — порядка $1\text{--}2 \text{ м}^3$.

Преимущества миниатюризации для РЭБ:

- **Мобильность.** Установка помещается в стандартный транспортный контейнер или на шасси бронемашины.

- **Модульность.** При выходе из строя одного модуля его можно быстро заменить без разборки всей системы.
- **Гибкость.** Переключение между модами (R_n, W_n) позволяет адаптировать пространственное распределение поля под конкретную задачу (например, подавление приёмников в заданной зоне).

Отсюда следует, что модель GS6 позволяет сократить объём установки в **5–10 раз** по сравнению с традиционными схемами при той же пиковой мощности 0,5 ГВт.

А.3. Оптический диапазон: миниатюризация до чипового уровня

Традиционные схемы

Для генерации импульсов с пиковой мощностью 100 ГВт в оптике традиционно используют:

- крупные лазерные усилители на стержнях из Nd:YAG или Ti:sapphire;

- оптические столы с точной юстировкой зеркал и линз;
- системы виброизоляции и термостабилизации.

Объём такой установки — обычно **несколько кубических метров** (оптический стол 2×1 М, стойки с электроникой, система охлаждения).

Схема на базе GS6

В рамках модели GS6 каскад строится из микрорезонаторов-«сэндвичей» Фабри-Перо с нелинейной активной средой. Можно показать, что:

- размер одного модуля — $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$ (чиповый формат), толщина активной среды — сотни микрометров;
- стопка из 6 модулей — всего $5 \times 5 \times 6 \text{ мм}^3$, т. е. **менее** $0,2 \text{ см}^3$;

- лабораторный стенд (с оптикой ввода/вывода, накачкой, системой синхронизации) — порядка $1 \times 1 \times 0,5 \text{ м}^3$;
- полностью интегрированный чип (с накачкой и электроникой) — **единицы-десятки кубических сантиметров.**

Преимущества миниатюризации:

- **Интеграция.** Стопка модулей может быть размещена на одном фотонном чипе вместе с волноводами и делителями пучка.
- **Точность.** Благодаря малым размерам и жёсткой фиксации элементов, положение пучностей и синхронизация «шторок» стабильны и воспроизводимы.
- **Энергоэффективность.** Компактные объёмы активной среды требуют меньше энергии накачки, а потери на каждом каскаде снижаются.

Отсюда следует, что модель GS6 открывает путь к **чиповым генераторам** пиковой мощности 100 ГВт, сокращая объём установки в **сотни раз** по сравнению с классическими лабораторными стендами.

Традиционная СВЧ-установка (0,5 ГВт):

Объём — 10–20 м³. Число активных модулей — 1–2 крупных усилителя. Управление резонансом — через внешние цепи и сложную юстировку. Положение пучностей определяется геометрией резонатора. Синхронизация импульсов — с помощью сложных систем обратной связи.

Мобильность — низкая, рассчитаны на стационарное размещение.

GS6-каскад в СВЧ-диапазоне (0,5 ГВт):

Объём — 1–2 м³. Число модулей — 3–5 сэндвич-модулей.

Управление резонансом — за счёт выбора мод (R_n, W_n) и масштабирования параметром Ω . Положение пучностей задаётся выбором моды и граничных условий.

Синхронизация — каскадная синхронизация «шторок».

Мобильность — высокая, возможна установка в транспортном контейнере или на мобильной платформе.

Традиционная оптическая установка (100 ГВт):

Объём — 3–5 м³. Число активных модулей — 1–3 больших усилителя. Управление резонансом — путём настройки зеркал, термоконтроля и точной юстировки. Положение пучностей — определяется геометрией резонатора и положением зеркал. Синхронизация импульсов — требуется точная синхронизация усилителей. Мобильность — низкая, предназначены для работы в лабораторных условиях.

GS6-каскад в оптическом диапазоне (100 ГВт):

Объём — 0,5–1 м³ (лабораторный стенд) либо 0,01–0,1 м³ (чиповое исполнение). Число модулей — 3–6 микрорезонаторов. Управление резонансом — на базе фиксированных мод GS6 и встроенных «шторок», без постоянной подстройки. Положение пучностей контролируется через параметры (R_n, W_n) и граничные условия. Синхронизация — встроена в каскадную схему за счёт синхронизации «шторок». Мобильность — средняя для стендового варианта, высокая для чипового исполнения.

Системы РЭБ (СВЧ)

Можно показать, что миниатюризация на базе GS6 позволяет:

- размещать мощные генераторы на малых носителях (БПЛА, лёгкие бронемашины, мобильные пункты управления);
- создавать распределённые сети излучателей, где каждый узел — компактный GS6-каскад, синхронизированный по времени;



- оперативно менять пространственное распределение поля (например, смещать зону подавления) за счёт переключения мод (R_n, W_n) .

Прецизионная фотоника и медицина (оптика)

Отсюда следует, что чиповые GS6-каскады открывают новые возможности:

- встраивание мощных источников в портативные медицинские приборы (лазерная хирургия, терапия);

- создание компактных систем спектрального уплотнения для связи;
- интеграция с метаматериалами для управления светом на субволновых масштабах.

Земля–Ионосфера

Для крупномасштабных задач (включая аналоги волн Шумана) важна не только абсолютная мощность, но и возможность формировать стоячие волны с заданными пучностями. В этом контексте:

- СВЧ-каскады GS6 обеспечивают высокую мощность при мобильности, что критично для полевых экспериментов;

- оптические каскады GS6 дают прецизионный контроль положения пучностей, что полезно для калибровки и диагностики крупномасштабных волновых структур.

Таким образом, модель GS6 предлагает **компромисс между мощностью, компактностью и управляемостью**, недостижимый в традиционных схемах.