

# Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы

## Часть 2

Александр Гордеев (г. Ульяновск)

Окончание статьи, начало которой опубликовано в предыдущем номере журнала «Современная электроника», посвящённой перспективной 300-градусной радиационно-стойкой силовой электронике, СВЧ-электронике, фотонике и релятивистской энергетике.

Вторая часть статьи, в продолжение её первой части [1], посвящена усовершенствованию материальной и физической модели, с возможностью практической реализации великолепной идеи выдающихся советских физиков С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова в области резонансно-параметрической волновой диэлектрической электроники, связанной с усилением и генерацией электромагнитных волн в твёрдом теле в начальном пета-диапазоне частот ( $> 3 \times 10^{14}$  Гц). Рискну предположить, что материал данной статьи может привести к значительному изменению архитектурного облика мировой электроники. Это связано с тем, что диэлектрическая (твёрдовакуумная – по моему определению) волновая электроника «на голову» быстрее «корпускулярной» электроники, то есть полупроводниковой электроники. Российские разработчики цифровых систем, владея текущими проектными нормами от 500 нм (МИЭТ, АО «ВЗПП-Микрон», НИИЭТ, ЗАО «Группа Кремний Эл», ТУСУР, ОАО «ОКБ-Планета» и др.), 130–90 нм (ОАО «НИИМЭ и Микрон» / ОАО «Ангстрем»), на моих новых физических моделях цифровых гетероячеек DRAM/SRAM смогут оперировать скоростями от единиц до десятков Тбит/с, а также транслировать в твёрдом теле мощные терагерцовые энергопакеты с надсветовыми фазовыми скоростями. По расчётному дизайну даже владеющее 3-микронной технологией ОАО «НПП Завод «Искра» (г. Ульяновск) сможет отгружать аналоговые высоковольтные терагерцовые чипы на Васильевский остров или в г. Жуковский для перспективного развития Концерна ВКО «Алмаз-Антей». Россия на основе новой физической модели, новой дизайн-платформы сможет вплотную подойти к реализации ещё более свежей идеи по

созданию терагерцовой радиомагнитроники (см. мою модель ускорителя для нейтронов в первой части настоящей статьи), с функциями цифровых систем, связи, радарных систем, навигации, аналогичными радиоэлектронике. Ничего не мешает модулировать квантово-точечную энергию в твёрдом теле по аналогии с модуляцией энергии электрического поля. Всё это в научно-популярной форме достаточно подробно изложено во второй части моей статьи на уровне, доступном для понимания и восприятия студентами третьих курсов физико-технических вузов.

Конечная цель статьи – политическая, и связана она с созданием в России предпосылок для развития качественно новой интеллектуальной «цифровой» экономики, опережающей мировой уровень.

### НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ РАДИОФИЗИКИ

Массу человека на 70–80% составляют молекулы воды ( $H_2O$ ). То есть подавляющее большинство атомов в нас – это водород. Атом водорода состоит из протона и орбитального электрона, и, как говорилось в первой части статьи, в нём нет второго нуклона, то есть нейтрона. Плотность вещества в ядре атома, состоящего из нуклонов (протонов и нейтронов) – около 100 млн тонн/см<sup>3</sup>, то есть в  $10^{14}$  выше, чем плотность воды. Другими словами, объём вещества (металла, диэлектрика, жидкости, газа) – это не что иное, как «дисперсный раствор» ядерных частиц (со сверхнизкой концентрацией) в «твёрдо-объёмном» вакууме, представляющий собой особый вид материи, в который поместили ничтожное (по объёмным меркам) количество ядерных частиц с огромными внутренними электромагнитными, внутриядерными

Статья публикуется в авторской редакции.

Мнение редакции не всегда совпадает с позицией автора. Но редакция открыта для диалога и предоставляет специалистам возможность донести свои идеи до аудитории журнала. Специализированный журнал – это информационная площадка, на которой порой встречаются самые невероятные проявления творческой мысли.

и другими полями, которые достигают порой гигантских величин.

Изменяя радиус орбиты электронов, частоту их колебаний и частоту колебаний ядер, мы имеем дело с дисперсией (изменением) квантово-точечной энергии внутри твёрдого тела, которая интерпретируется как:

$$W = \frac{\epsilon \times E^2}{8\pi} = \frac{\mu \times H^2}{8\pi}, \quad (1)$$

где  $E$  и  $H$ , соответственно, напряжённость электрического и магнитного полей, а  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, в данном случае – атомной решётки твёрдого тела.

При внешнем полевом воздействии на кристалл мы, вследствие дисперсии во времени значений  $\epsilon$  и  $E$ , получим дельта ( $\Delta$ ) или приращение, или уменьшение квантово-точечной энергии, или:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d\epsilon}{dt} \times \epsilon_0 \times \frac{1}{8\pi} \times \frac{d(E)^2}{dt}. \quad (2)$$

Если поле в одном месте больше, а в другом – меньше (исходя из Максвелловского «сшивания» двух сред  $\epsilon_1 \epsilon_0 E_1 = \epsilon_2 \epsilon_0 E_2$ ), мы будем наблюдать явление дивергенции поля (то есть движения поля из более высокой энергозоны в более низкую энергозону) или:

$$\operatorname{div} E = -E \times \frac{1}{\epsilon} \operatorname{grad} \epsilon, \quad (3)$$

где

$$\frac{1}{\epsilon} (\operatorname{grad}) = \operatorname{grad} (\ln \epsilon). \quad (4)$$

Данные математические определения дивергенции поля  $E$  и градиента  $\epsilon$  показаны в работе В.А. Зверева, Е.В. Кривопустовой и Т.В. Точиной [2].

В таком случае последние формулы демонстрируют очевидное наличие генерации электрического сигнала в кристалле поляризованного диэлектрика, к которому приложено постоянное поле смещение с наложением на

него внешнего ВЧ, СВЧ, ТГц или инфра-красного/оптического воздействия.

Всё вышесказанное подтверждается также эффектами Поккельса и Фарадея, Котгона-Мутона (Фойгта) из СВЧ-раздела электромагнитной оптики, широко применяемых за рубежом в системах радиолокации, связи, навигации и, как обычно, с некоторым отставанием – в разработках отечественных модуляторов для ВОЛС на базе GaAs или GaP.

Максвеллом было установлено, что скорость световой волны, как, впрочем, и любой ВЧ-, СВЧ- или ТГц-волны, в кристалле диэлектрика определяется соотношением:

$$V = \frac{C}{n},$$

где  $C$  – скорость световой (оптической) волны в вакууме, равная  $C = (2,99776 \pm 0,00004) \times 10^{10}$  см/с (для сравнения, на дрейфовых расстояниях/длинах канала более чем 0,12 мкм в полупроводниках скорость электромагнитной волны, определяемая дрейфом электронов, на три порядка ниже и не превышает  $2 \times 10^7$  см/с), а  $n$  – показатель преломления, равный  $n = \sqrt{\mu\epsilon} \approx \sqrt{\epsilon}$ .

Исходя из формулы, мы имеем скорость электромагнитной волны в диэлектрике равной:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Следовательно, если:

- а)  $\epsilon > 1$ , то скорость волны в диэлектрике меньше скорости света;
- б)  $\epsilon < 1$ , то фазовая скорость волны в диэлектрике больше скорости света;
- в)  $\epsilon = 0$ , то в диэлектрике отсутствует как электрическое, так и магнитное поле; это так называемый поляризационный коллапс, который достигается на определённых частотах;
- г)  $\epsilon < 0$ , то очевидно, что внешняя электромагнитная волна, падающая на диэлектрический материал (поверхность) будет иметь полное отражение, независимо от угла падения луча (электромагнитной волны) или будет явление физического упругого «отскока» волны.

Значения  $\epsilon < 1$  – не новость. Такие значения диэлектрической проницаемости встречаются в ионосфере (100–220 км от поверхности Земли). Там, где ионосфера послойно имеет относительно высокую плотность плазмы (состоящую, в основном, из ионов кислорода и электронов), что наблюдается в районе Южного магнитного полюса (Гренландия) и на российском Заполярье, из-за низких значений  $\epsilon$  наблюдается не только дисперсия радиоволны

(например, «загоризонтной» метровой/дециметровой АФАР), но и дисперсия её энергии (или, по-другому, – дисперсия длины волны).

Дисперсия  $\epsilon$  (диэлектрической проницаемости) в диэлектрических твёрдых средах связана со скоростью механизма поляризации в кристалле, что ярко выражается в диэлектриках с ионно-связанной кристаллической решёткой. Дисперсия  $\epsilon$  зависит от частоты и амплитуды электрического, точнее, приложенного электромагнитного поля:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r}).$$

Общий вид зависимости  $\epsilon = f(\omega, E)$  показан на рисунке 1 [3].

С частот  $10^4$ – $10^5$  Гц начинает заметно меняться объёмно-зарядовая поляризация в объёме диэлектрика (поляризационная экранизация внешнего поля на упорядоченном накоплении заряженных частиц в объёме диэлектрика – диполей ионов и электронов), пропорциональная в макромасштабе энергии заряженного конденсатора:

$$W = \frac{1}{2} CU^2,$$

где  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{l}$ , а  $U$  – приложенное напряжение.

В диапазоне частот  $10^6$ – $10^{11}$  Гц постоянно «устают» следовать за частотой электронная, ионная и дипольная поляризации, а на частотах  $10^{11}$ – $10^{15}$  Гц (ИК и оптический диапазон), наблюдается очень высокая дисперсия  $\epsilon$ , что обусловлено резким запаздыванием ионно-упругой и дипольно-упругой поляризации. В области жёсткого ультрафиолета и субрентгеновского диапазона диэлектрическая проницаемость обусловлена только электронной упругой поляризуемостью. Далее при частотах свыше  $10^{17}$  Гц поляризация невозможна и  $\epsilon = 1$ , то есть, исходя из уравнений Максвелла  $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ ,  $\mu \approx 1$ , а  $\epsilon_{\text{отт.}} = n^2$ . В вакууме и тропосфере  $\epsilon = 1,0$ ; в ионосфере  $\epsilon < 1,0$ .

Таким образом, в основе изменения энергии кристалла в терагерцовом диапазоне лежит явление поляризации атомов кристаллической решётки диэлектрика при сверхмалой плотности электронов в объёме диэлектрика ( $< 10^6$  см<sup>-3</sup>). И естественно, что модуляция или изменение квантово-точечной энергии твёрдотельного диэлектрика будет сильно зависеть от такого физического явления, как поляризуемость атома.

Из анализа статьи «Свободные электроны в твёрдых телах» [4], следует, что атомы первой (щелочной) группы таблицы Д.И. Менделеева, такие как

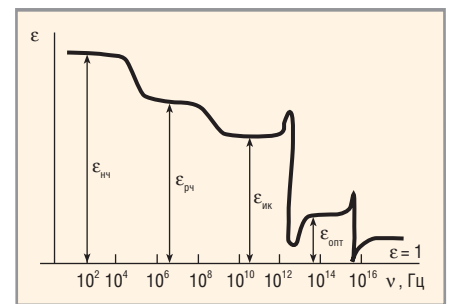
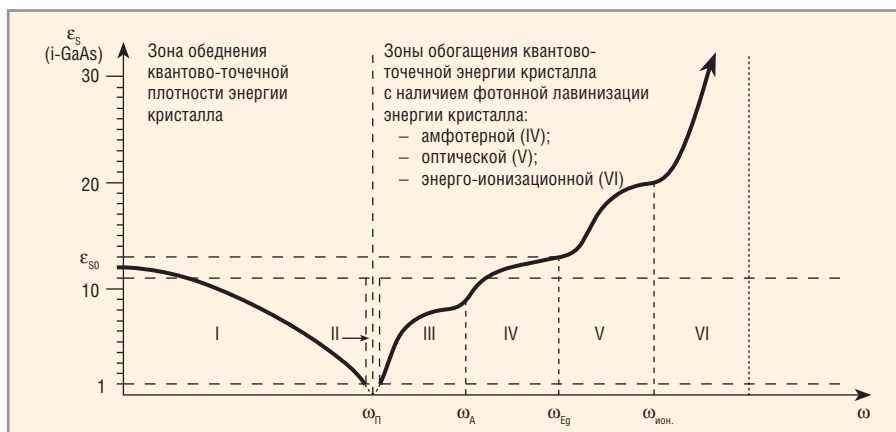


Рис. 1. Классическая зависимость диэлектрической проницаемости от частоты [3]

Li, Na, K, Rb, Cs, имеют исключительно высокую атомную поляризуемость от  $151 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup> (Li) до  $620 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup> (Cs). И не случайно, что самые первые оптодевайсы Маха-Цандера (модуляция фазы оптоволны), построенные на эффекте Поккельса, были созданы на кристаллах атомов щелочных металлов, в частности, на ниобате лития (LiNbO<sub>3</sub>) и на фосфорнокислом калии (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Такие проблемы, как специфичность, климатические требования и стоимость позже привели к созданию полупроводниковых оптодевайсов для ВОЛС, выполненных на GaAs, GaP и др., но обязательно с присутствием такого элемента, как галлий (Ga). Почему? Всё дело в том, что роль «щелочного» атома, атома с очень высокой поляризуемостью, берёт на себя атом галлия, в котором проявляется атомная поляризуемость, близкая по значениям к атомной поляризуемости лития – у атома Li поляризуемость находится на уровне  $151 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, а у атома Ga –  $146 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup> (для сравнения: у Si –  $48 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, C –  $10 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, P –  $45 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, As –  $58 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, Ge –  $57 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, N –  $42 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>, Cl –  $73 \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup>).

Подытоживая поляризационные свойства атомов через призму молекулярных соединений, если сравнить молекулы поваренной соли (NaCl) и GaAs, мы заметим очевидно выраженное сходство, которое заключается в том, что атомно-поляризационное соотношение в молекулах NaCl и GaAs выглядит так:  $(320/73) \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup> у NaCl и  $(146/58) \times 10^{-30}$  м<sup>-3</sup> у GaAs. Из этого следует, что арсенид галлия – это, как и соли щелочных металлов, выраженное молекулярное соединение с ионной связью, которая во многом и определяет его свойства и, в частности, поляризационные свойства, что резко отличает его от, допустим, кремния – с ковалентной связью в кристалле.

Исходя из анализа свойств практически диэлектрического, совершенного по кристаллической структуре LPE i-GaAs



**Рис. 2. Предполагаемая энергозависимость дисперсии  $\epsilon$  в амфотерно-легированном LPE i-GaAs (график демонстрируется впервые)**

(SiO) монокристалла с  $\rho > 10^9 \text{ Ом} \times \text{см}$ , его предполагаемая качественная характеристика дисперсии  $\epsilon$  показана на рисунке 2. В зонах I, II скорость электромагнитной волны в GaAs возрастает до световой, с возможностью фазового опережения. В зонах III + VI скорость электромагнитной волны в GaAs-резонаторе замедляется из-за экситонного и электронного насыщения кристалла.

**«СТАРЫЙ» НОВЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ**

Первое, чем я хотел бы «обрадовать» оппонентов, – это то, что идея стара, доказана полвека назад. Я всего лишь немного её «реставрирую». Суть идеи представлена в работе Кролла [5] и статье наших учёных, лауреатов Ломоносовской и Ленинской премий С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова [6]. Работоспособность идеи подтвердили в 1965 г. тот же С.А. Ахманов со своей группой [7], а также американские учёные Дж. Джорджмейн и Р. Миллер [8].

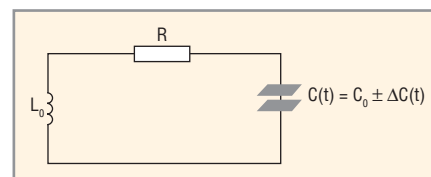
Подробности толкования идеи также очень хорошо описаны в работе «Новые источники и приёмники ИК и терагерцового диапазона» [9], где показано, что «в основе этого явления лежит воздействие оптической среды с нелинейными свойствами (например, кристаллов KDP и  $\text{LiNbO}_3$ ), которая возбуждается мощной световой волной, называемой волной накачки, на две или большее число световых волн при их распространении в этой среде. При параметрическом возбуждении интенсивный световой пучок вызывает модуляцию параметров, определяющих развитие других связанных колебаний в системе. В этом процессе правило суперпозиции колебаний не выполняется... Параметрический резонанс – явление, приводящее к усилению

и генерации электромагнитных колебаний за счёт работы, совершённой внешним источником при периодическом изменении во времени реактивных параметров колебательной системы».

В приведённой из работы [9] цитате просто и ёмко представлена суть идеи усиления в петадиапазоне длин волн.

Прежде чем более подробно довести до читателя эффект параметрического резонанса (усиления, генерации) в петадиапазоне и перевести его в терагерцовый, субтерагерцовый и дальний СВЧ-диапазон, необходимо сделать следующие допущения:

1. Здесь речь идёт о свойствах нелинейных оптических сред, как правило, – диэлектриков, молекулы которых содержат атомы с резко выраженной атомной поляризацией, например,  $\text{LiNbO}_3$  или, допустим,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , то есть на химических соединениях ионного типа.
2. В основе идеи лежит фундаментальное явление аккумуляции или обеднения квантово-точечной энергии кристалла вследствие дисперсии важнейших параметров для диэлектрика, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости квантово-точечной системы, поскольку объём частиц атома (ядро из протонов и нейтронов, орбитальные электроны) составляет мизерные доли общего объёма атома, а остальное пространство – это та же материя в виде энерговакуума в твёрдом теле.
3. Фазовая скорость распространения генерируемой параметрически-резонансной электромагнитной волны в кристалле поляризованного диэлектрика может быть:
  - а) меньше скорости света в вакууме;
  - б) равной скорости света в вакууме;
  - в) больше скорости света в вакууме.



**Рис. 3. Колебательный контур:**

L – индуктивность, C – переменная ёмкость, R – активное сопротивление

Кристалл может стать «невидимкой» или «антиприёмником» электромагнитной волны (упругий «отскок» волны или огибание волной «неприятельской» среды). Данное явление ожидается, когда  $\epsilon < 0$ .

Смысл работы параметрического усилителя раскрывается на примере элементарного контура (см. рис. 3). Если в LC-контуре существуют слабые колебания  $U = U_0 \sin \omega_0 t$  с периодом  $T = \sqrt{L_0 C_0}$  и энергией  $W = q^2 / 2C_0$ , то  $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$  – собственная частота колебаний контура. В нелинейном оптическом/терагерцовом диапазоне  $L_0$  не является постоянной величиной. Это связано с тем, что уже с мегагерцовых частот возникает наведённая индуктивность, но сделаем допущение, что в данном случае субнаногенри являются постоянной величиной.

При раздвижении пластин конденсатора необходимо совершить работу, которая пойдёт на увеличение потенциальной энергии конденсатора, и наоборот, при сближении пластин энергия забирается. Если увеличить расстояние между пластинами, то это эквивалентно изменению  $\Delta\epsilon$  среды между пластинами и ёмкость  $C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\ell}$ ; а, следовательно, и потенциальная энергия конденсатора, изменится на величину

$$\Delta W = \frac{q^2}{2} \left( \frac{1}{C_n} - \frac{1}{C_0} \right) = m \times W_0,$$

где  $m = \frac{C_0 - C_n}{C}$ , что Андронов А.А., Захаров А.А. и Др. в своей работе [9] назвали глубиной модуляции, а  $W_0$  – начальной энергией конденсатора.

Если периодически скачкообразно менять расстояние между пластинами, то есть ёмкость с частотой  $\omega_n = 2\omega_0$  (или с периодом  $\frac{1}{2}T$ ), то энергия в контуре будет увеличиваться, и амплитуда начальных колебаний  $U_0$  (в  $U = U_0 \sin \omega_0 t$ ) – растёт. В реальных контурах существуют потери энергии вследствие практически неизбежного сопротивления R или

$$\delta W = \frac{2\pi \times W_0}{Q},$$

где  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_0}{C}}$  – добротность контура.

Прирост энергии за период  $T$  будет равным

$$\Delta W - \delta W = 2 \left( m - \frac{\pi}{Q} \right) W_0$$

и зависит от знака разницы  $\left( m - \frac{\pi}{Q} \right)$ , если  $\left( m - \frac{\pi}{Q} \right) > 0$ , то прирост  $\Delta W$  положителен, и амплитуда колебаний  $U = U_0 \sin \omega_0 t$  перерастает в амплитуду  $U = U_1 \sin \omega_n t$  (где  $U_1 > U_0$ ).

В итоге, смысл параметрического усилителя в том, чтобы  $\frac{C_0 - C_1}{C_n} > \frac{1}{Q}$  или  $\Delta C > \frac{1}{Q}$ .

При приближении возбуждающей частоты  $\omega_n$  к  $2W_0$  амплитуда вынужденных колебаний возрастает, но не в  $Q$  раз, а в  $Q_{\text{нэфф.}} = \frac{Q}{1 - \frac{m \times Q}{\pi}}$  раз.

Или коэффициент усиления  $K_{\text{ус.}}$  параметрического усилителя будет равен:

$$K_{\text{ус.}} = \frac{Q}{Q_{\text{нэфф.}}} = \frac{1}{1 - \frac{m \times Q}{\pi}}$$

При этом при  $m > \frac{\pi}{Q}$  усилитель превращается в генератор.

В итоге, если построить два контура, таких, как показано на рисунке 3, и соединить их параллельно/последовательно, то мы сможем в нагрузке второго контура получить усиление с преобразованием частоты ( $\omega_1 + \omega_2$  – частоты первого и второго контура). Условие возбуждения двухконтурного параметрического усилителя–генератора заключается в выражении:

$$m > \frac{\pi}{\sqrt{Q_1 Q_2}}$$

а если от гармоник перейти на терагерцовое импульсное возбуждение, то необходима поправка:

$$m > \frac{2}{\sqrt{Q_1 Q_2}}$$

### ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГЕНЕРАТОР НА LPE-МОНОКРИСТАЛЛЕ i-GaAs (SiO)

Исходя из приведённых классических формулировок физических законов электромагнитных явлений в твёрдых телах, обладающих в равновесном состоянии ярко выраженными диэлектрическими свойствами и сильно выраженной частотной зависимостью квантово-механической плотности электромагнитной энергии  $\sim \epsilon E^2 / 8\pi$ , вполне реально построить новые терагерцовые и СВЧ-приборы с функциями усиления, генерации, смещения, фазовращения и др. Если мы имеем совершенный по структуре (с почти нулевой плотностью дислокаций и кластерных дефектов) волноводный брусок GaAs с  $\rho \approx 10^9$  Ом  $\times$  см и выше, то совершенно очевидно, что с помощью приве-

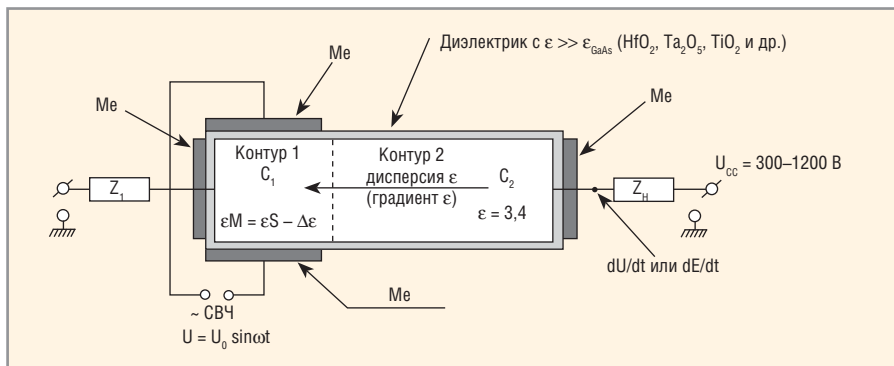


Рис. 4. GaAs-генератор с двумя колебательными контурами с  $Z_{1-GaAs}(t)$  и  $Z_{\text{нагрузки } 2-GaAs}(t)$

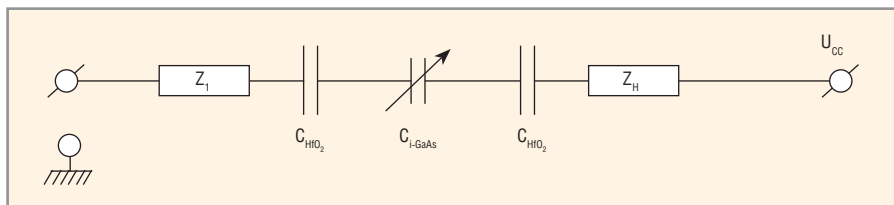


Рис. 5. Эквивалентная схема генератора

дённых ранее аксиом можно построить генераторы и усилители терагерцового диапазона частот, почти вплоть до границы красного/ИК-диапазона, то есть до критической частоты оптического поглощения с высоким квантовым выходом в GaAs с энергией 1,42 эВ или  $\lambda \approx 0,81$  мкм (верхний порог видимого красного диапазона – 0,75 мкм).

Физическая модель твердотельного терагерцового LPE i-GaAs-генератора показана на рисунке 4. На рисунке представлен двухконтурный параметрический генератор, где диэлектрический волновод на основе i-GaAs-структуры покрыт диэлектрическими стенками, имеющими значительно больший показатель преломления электромагнитной волны (т.н. отражательные стенки).

На рисунке 5 показана эквивалентная схема генератора. Колебания сигнала в его цепи определяются скоростью частотной модуляции величины  $C_{i-GaAs}$ , которая определяется атомной поляризацией Ga в LPE i-GaAs-кристалле.

За дивергенцией электрического поля  $\text{div} E = -E \frac{1}{\epsilon} \text{grad} \epsilon$  последует изменение волнового сопротивления монокристалла LPE i-GaAs, которое вызвано дисперсией диэлектрической проницаемости в контуре 1 и, соответственно, за этим последует запаздывающая дисперсия  $\epsilon$  в контуре 2.

Вследствие этого мы будем наблюдать дисперсию максвелловского сшивания, в данном случае двух сред (контур 1 и контур 2) или  $\epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2$ , что математически можно выразить следующим образом:

$$\epsilon_0 \times \frac{d\epsilon_{s1}}{dt} \times \frac{dE_1}{dt} = \epsilon_0 \times \frac{d\epsilon_{s2}}{dt} \times \frac{dE_2}{dt}$$

или

$$\frac{d\epsilon_{s1}}{dt} \times \frac{dE_1}{dt} = \frac{d\epsilon_{s2}}{dt} \times \frac{dE_2}{dt}$$

Самогенерация волны в кристалле, в конечном счёте, приведёт к третьему значению  $\epsilon_{s3}$ , которое будет удовлетворять неравенству  $\epsilon_{s0} > \epsilon_{s1} > \epsilon_{s2} > \epsilon_{s3}$  или  $\Delta \epsilon = \epsilon_{s0} - \epsilon_{s3}$ .

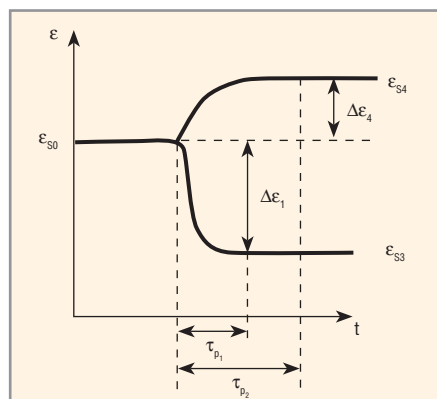
В целом кристалл LPE i-GaAs будет напоминать новую модель условного «варикапа», который в зоне I дискретно-поляризационной характеристики (см. рис. 2) можно назвать не иначе как «релятивистским варикапом», имеющим в качественной интерпретации характеристику, показанную на рисунке 6.

Совершенно очевидно, что за время  $\tau_p$ , которое будет определяться интегральными величинами времени пролёта серии волн через монокристалл со скоростями

$$V_0 = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_{s0}}}; V_1 = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_{s1}}}; V_2 = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_{s2}}}; V_3 = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_{s3}}}; V_4 = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_{s4}}}$$

мы будем иметь генерацию целого спектра волн, проходящих через волновод LPE i-GaAs. Пролётное время волн изменяется от  $\tau_1 = \frac{l_{GaAs} \sqrt{\epsilon_{s3}}}{C_0}$  до  $\tau_3 = \frac{l_{GaAs} \sqrt{\epsilon_{s1}}}{C_0}$ .

Несложно подсчитать, что при длине GaAs-монокристалла, равной 50 мкм, пролётное время волны составит в худшем случае ( $\epsilon = \epsilon_{s0}$ ) порядка  $5,5 \times 10^{-15}$  с или, в переводе на начальную частоту колебаний,  $f \approx 290$  ГГц. При значении  $t_3$  предельная частота колебаний, в принципе, может удвоить-



**Рис. 6.** Дисперсия  $\epsilon$  в монокристалле LPE i-GaAs, когда  $\epsilon_3 < \epsilon_{30}$  и  $\epsilon_4 > \epsilon_{30}$ , при этом  $\tau_{p1} < \tau_{p2}$

ся/утроиться, то есть достигнуть 500–800 ГГц, а при  $\epsilon < 1$  перешагнёт рубеж 1 ТГц при рабочих значениях  $U_{cc} \approx 1000$  В.

Подбором комплексных импедансов  $Z_1$  и  $Z_{II}$  мы можем создать резонансно-контурный LC-фильтр с резонансными частотами как для входящего сигнала, приводящего к дисперсии  $\epsilon$ , так и для целого спектра генерируемых гармоник, из которых можно будет выделить нужную, с частотой, равной

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

**Некоторые феноменологические описания элементов терагерцовой схмотехники**

Ранее в статье было показано исполнение резонансно-параметрических генератора и усилителя в дальнем СВЧ-, тера- и петачастотных диапазонах ( $\lambda = 1,0 \div 0,001$  мм) с управляемой дисперсией частоты (перенастройкой частоты).

Возникает вопрос: возможно ли построение узлов, компонентов, преобразователей в терадиапазоне по аналогии с СВЧ-диапазоном, допустим, для терадаров, широкополосной или Bluetooth-связи? Да, возможно. С позиции радиофизики эта проблема также может быть успешно решена.

Далее приводятся некоторые описания уникальных тераузлов и элементов.

**Линии задержки**

1. Мы не раз говорили, что в металлах СВЧ-волна – это не поток электронов, а волновое колебание решётки металла, в частности, за счёт скин-поляроидного эффекта. Вследствие того, что металлы слева и справа от водорода в ряду электрохимической активности обладают существенно различными значениями  $\epsilon$  и  $m$ , волны в них будут двигаться на разных скоростях. Например, время прохождения электромагнитной волны

в Ag-волноводе и Ni-волноводе может различаться в разы.

2. Дисперсия значений  $\epsilon$  – сама по себе дисперсия скорости волны в LPE i-GaAs-волноводе. Если, допустим,  $\epsilon \approx 11,5$ , то  $V = 0,3C$ ; если  $\epsilon = 1$ , то  $V = C$ , то есть 0,3С против С – достаточно солидная задержка при одинаковой длине GaAs-резонатора, то можно сделать неплохие линии задержки.

3. В статье «Фотонная и релятивистская энергетика на основе LPE i-GaAs-монокристаллов» [10] приведена конструкция квантового вентиля (преобразователя скорости волны) с торможением скорости прохождения волны на 1–3 порядка.

4. Эффекты Фарадея, Коттона-Мутона (Фойгта) – фактически, абсолютные теравентили, которые, поляризуя, например, стоячую тераволну в плоскую, могут сколь угодно держать тераволну в «запертом» состоянии.

**Линии ускорения**

Линии ускорения впервые предлагаются для реализации как в СВЧ-, так и в терадиапазоне. Суть проста: если проанализировать график на рисунке 6, то становится ясно, что при значениях  $\epsilon \rightarrow 1$  и значениях  $\epsilon < 1$  фазовая скорость волны в LPE i-GaAs-резонаторе будет либо близка к световой, либо выше скорости света в вакууме. Следовательно, входную волну, прошедшую усиление на входном тракте, можно разделить на два «ручья» (канала), где по первому – основному – каналу она, допустим, поступит на входной компаратор АЦП, а вторая «необыкновенная» волна с ускорением проникнет в «тыл» АЦП, найдёт в цифровом банке себе квантованное подобие (дубликат), которое будет подаваться на компаратор по линии обратной связи. Таким образом, линия ускорения – это достаточно интересная находка для создания терагерцовых АЦП. (В России проблемы с АЦП – даже в X-диапазоне при построении ЦАФАР).

**Фильтры**

Мы ранее подчеркнули, что резонансно-параметрические генераторы сами по себе являются фильтрами, поскольку в них работает формула

$$\omega = \frac{1}{2\pi\sqrt{2C}}$$

Есть и другие конструктивные LC-решения.

Но есть и простые волноводные решения, когда, например, «нижние

частоты» можно «обрезать» размерами волновода LPE i-GaAs (SiO).

**Умножители частоты**

Механизм умножения частоты достаточно прост. Он связан с дисперсией  $\epsilon$ . Если  $\epsilon$ , допустим, равно  $\epsilon_0 = 11,5$ , то время пролёта волны в волноводе (как электрона в полупроводнике) будет диктоваться длиной волновода. Если же  $\epsilon = 1$ , то и максвелловская скорость волны  $V = C/n$  будет в  $\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}}$  раз больше (в данном случае, в 3,4 раза), тогда и частота генерации возрастает в 3,4 раза. Таким же способом можно «делить» частоту; функцию умножения может также выполнить релятивистский варикап (см. рис. 4).

**Смесители частоты**

Интерференция частот качественно показана на примере исполнения «релятивистского варикапа» (см. рис. 4).

**Фазоинверторы, фазовращатели**

Несколько вариантов:

- а) «длинный» LPE i-GaAs-резонатор/волновод;
- б) промежуточный металловолновод (допустим, комбинация Ag- и Ni-волноводных перфораторных лент);
- в) «релятивистский варикап».

**Терагерцовые умножители напряжения**

Здесь нет ничего сложного. Например, необходимо набрать несколько киловольт для частоты 1 ТГц и «стыковать» их с антенной. Для этого просто набирается «столб» резонансно-параметрического усиления с гальваноразвязкой по управлению – обычная «оптопара», то есть ИК-фемтолазер и резонатор LPE i-GaAs (SiO). Вопрос только в синхронизации запуска волны в элементах/звеньях столба. Эта проблема может быть решена, например, с помощью LPE i-GaAs-фемтооптопреобразователя, построенного по типу: лазер ( $\lambda_1$ ) → приёмник → лазер ( $\lambda_2$ ) → резонатор. В принципе, данный преобразователь может быть монокристалльным.

**Аттенюатор**

Нет ничего проще, чем удлинить волновод LPE i-GaAs (SiO), поддерживая в нём одну и ту же резонаторную среду.

**ЦАП**

Ключевыми элементами терагерцовых ЦАП являются шифратор, контроллер, скоростной драйвер, генератор, терагерцовый преобразователь (опто-

ключ на основе ИК-фемтолазера и резонатора LPE i-GaAs (SiO)). Все названные элементы с позиции конструкции и физики прекрасно просматриваются. Что касается цифровой входной системы, то, конечно, нужна тактовая частота хотя бы в 1,0 ТГц. Физически её можно реализовать на квантово-точечных встроенных экситонах в LPE i-GaAs (SiO).

### АЦП

Ключевые моменты, как уже говорилось, следующие:

- линия ускорения;
- эффект дубликата входящей волны по линии обратной связи;
- фазово-частотный компаратор (не путать с «вольтаическим» компаратором);
- скоростные цифровые схемы (в терагерцовом диапазоне) – дешифратор, регистры и т.д.

Всё при желании можно сделать, был бы уровень понимания и финансовые средства.

### Цифровые системы

Подходов здесь несколько, а именно:

- динамическая память на «реактивных» транзисторах (диэлектрических транзисторах GaAs – HJMOSFET – реактивные DRAM;
- статическая энергонезависимая память – на туннельной гетероинжекции GaAs – HJMOSFET (с плавающим затвором) с петастирированием;
- динамическая память на гибридных конструкциях HJMOSFET – HNT – транзисторах (HNT – это что-то наподобие  $n^+i-n^+$ -транзисторов с HJMOS-затвором).

Наконец, есть возможность реализации мечты величайшего отечественного специалиста по микроэлектронике К.А. Валиева (автор этой статьи в 1974 г. имел честь представлять ему в НИИМЭ свою дипломную работу по физике плотности энергосостояний в МОП-структурах), а именно, – квантового компьютера. В.Е. Войтович создал водородоподобные симметричные относительно уровня Ферми комплементарные (биполярные) состояния большой плотности (до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), которые автор данной статьи называет встроенными квантово-точечными экситонами, что даёт большие возможности. Скорость отклика электронов и дырок с амфотерных «гнезд» – не хуже  $10^{-12} \text{ с}$ , они не «греются» при возврате, то есть рекомбинация ИК-излучения до уровня InSb/PbTe; удобно создать экситонную энергетику ИК-подогревом и далее – поле – через

нанозатвор. Таким образом, фактически имеется всё для создания квантового компьютера в России. «Экситонные» компьютеры Россия могла бы создать «вчера».

### ФАР

Строится по схеме:

- терагерцовый высоковольтный умножитель – столб;
- гетеробарьеры из полиароидного металла, выполненные на резонаторе LPE i-GaAs и расположенные пофазово;
- волна, возбуждающая систему GaAs – полиароид;
- излучение.

Металлоперфоратор на выходе высоковольтного тераумножителя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье показано, что «всё новое – это хорошо забытое старое». На фоне ограниченных финансовых и технологических ресурсов Россия имеет возможность стать одним из мировых лидеров в стратегически важных терагерцовых информационных системах. Фактически, это один из проектов по созданию отечественной «цифровой» экономики.
2. В публикации впервые показана инвариантность и ёмкость новых физических моделей и перспективных конструктивных решений в дальнем СВЧ-, тера- и петадиапазонах частот в части создания параметрических генераторов, усилителей, умножителей, смесителей, делителей, фазовращателей, линий задержки, линий ускорения, фильтров, аттенуаторов и др.
3. В статье подчеркнуты абсолютно новые возможности реализации неизвестных ранее цифровых и аналогово-цифровых технических решений для дальнего СВЧ, терагерцового диапазона, включая квантовые встроенно-экситонные цифровые технологии на основе монокристаллов LPE i-GaAs (SiO). Впервые предложен единый ТГц-блок «пять в одном», объединяющий связь, радар, «цифру», РЭП и навигацию.
4. В очередной раз подчеркивается, что новая высокотемпературная высоковольтная гиперчастотная радиационно-стойкая электроника и радиофизика на базе уникальных монокристаллов LPE i-GaAs (SiO) – это новый бизнес, доходы от которого могут быть сравнимы с доходами от нефтяного бизнеса.
5. Предложенный в серии публикаций в журнале «Современная электроника» ряд проектов на основе монокристаллов LPE i-GaAs (SiO) может стать основой формирования опережающих мировой уровень ФЦП в области электроники и радиофизики («Программа экспортозамещения»).

6. Автор считает, что статья будет полезна руководителям и специалистам «Ростеха», Концерна КВО «Алмаз-Антей», АФК «Система» («РТИ»), «Роскомоса», «Росатома», «Росавиации», а также руководителям финансовых «двигателей» экономики – Сбербанк, Внешторгбанк, Газпромбанк, ВТБ-капитал и других.
7. Приведённые в статье технические решения патентуются.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы. Часть 1. Современная электроника. 2016. №6.
2. Зверев В.А., Кривопустова Е.В., Точилина Т.В. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов «Оптические материалы». Часть 1. Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики. Санкт-Петербург. 2009.
3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела. М. Высшая школа. 2000.
4. Гроссе П. Свободные электроны в твёрдых телах. Москва. Изд. «Мир». 1982.
5. Kroll N.M. Parametric Amplification in Spatially Extended Media Amplification to the Design of Tunable Oscillator at Optical Frequencies. Phys. Rev. 1962. V. 127. №4. P. 1207–1211.
6. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Об одной возможности усиления световых волн. ЖЭТФ. 1962. Т. 43. №1. С. 351–353.
7. Ахманов С.А. и др. Перестраиваемый параметрический генератор света на кристалле KDP. Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. №9. С. 372–378.
8. Giordmaine J.A., Miller R.C. Tunable Coherent Parametric Oscillation in  $\text{LiNbO}_3$  at Optical Frequencies. 1965. Phys. Rev. Lett. 14. P. 973–976.
9. Андронов А.А., Захаров А.А. и др. Новые источники и приёмники ИК и терагерцового диапазона. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применения». Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород. 2007.
10. Войтович В.Е., Гордеев А.И., Звонарёв А.В. Фотонная и релятивистская энергетика на основе LPE i-GaAs-монокристаллов. Современная электроника. 2015. №7. ©