

06;07;09

Применение генератора импульсов тока на диоде Ганна для модуляции полупроводниковых лазеров

© С.И. Домрачев, С.А. Алавердян, В.Н. Скороходов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Научно-исследовательский институт механики и физики, 410026 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 21 ноября 1997 г.)

Диод Ганна (ДГ) широко применяется как достаточно эффективный генератор сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний в диапазоне от одного до сотен GHz. В нерезонансной широкополосной цепи колебания тока ДГ имеют вид периодической последовательности коротких импульсов, длительность которых может составлять десятки пикосекунд, амплитуда — несколько ампер. При этом частота следования, амплитуда и длительность импульсов относительно слабо зависят от величины и характера нагрузки (в известных пределах), т.е. импульсный ДГ генератор является СВЧ генератором тока. При соответствующей доработке конструкции ДГ и электродинамической системы возможны режимы синхронизации, управления внешним информационным сигналом. Указанные свойства позволяют использовать ДГ в качестве быстродействующих управляющих элементов в функциональных устройствах микроэлектроники [1,2], в частности для модуляции полупроводниковых инжекционных лазеров (ИЛ).

Сложность получения эффективной модуляции ИЛ определяется тем, что ИЛ является низкоомной нелинейной нагрузкой с реактивной составляющей. Поскольку импеданс ИЛ зависит от частоты и амплитуды сигнала [3], то согласовать его с источником накачки в широкой полосе весьма сложно. Реальное быстродействие ИО ограничивается также релаксационными колебаниями оптоэлектронной природы [3], возникающими в собственно лазерной структуре или в системе ИЛ–управляющая цепь в общем случае. Паразитные релаксации могут быть подавлены или ослаблены, если для модуляции ИЛ использовать ДГ в режиме генератора тока. Низкий импеданс ИЛ является благоприятным обстоятельством для устойчивой работы ДГ.

Модуляция ИЛ в цепи ДГ исследовалась в работах [4–6]. В этих экспериментах токовые характеристики ДГ и ИЛ не были согласованы, фактически лазеры управлялись напряжением через пассивную разделительную цепь. Так как использовались неоптимальные режимы модуляции, в выходном излучении наблюдались сильные релаксации [6].

В настоящей работе исследуется модуляция ИЛ короткими и ступенчатыми импульсами тока диода Ганна при соблюдении режима генератора тока в управляющей цепи. Приводятся также результаты модуляции ИЛ импульсами от генератора напряжения.

СВЧ стабилизация тока в цепи нагрузки ДГ осуществляется вследствие быстрой перестройки электрических доменов в образце ДГ при изменении какого-либо из параметров цепи: сопротивления нагрузки, напряжения питания и др. Время перестройки и соответственно время установления (стабилизации) тока не превышают времени формирования домена, которое может быть оценено по формуле приведенной в [1],

$$t_f = \frac{3.5}{\mu} \sqrt{L\varepsilon/8\pi qn_0(E_t - E_r)},$$

где L — длина диода, ε — диэлектрическая проницаемость материала ДГ, μ — подвижность носителей, q — заряд электрона, n_0 — концентрация носителей, E_t — пороговое поле ($3.2 \cdot 10^5$ V/m в GaAs), E_r — остаточное поле в образце с доменом; при оценках можно полагать $E_r \approx E_t/2$.

Для применявшихся в настоящей работе ДГ (параметры см. ниже) оценка времени формирования (длительности импульса тока) дает $t_f \sim 15$ ps. Переходное время возрастает до t_R [2], если последовательно с диодом включается резистивная нагрузка R_L

$$t_R = t_f \sqrt{1 + R_L/R_0},$$

где R_0 — малосигнальное сопротивление ДГ.

Таким образом, длительность переходных процессов минимальна, если сопротивление нагрузки мало по сравнению с сопротивлением ДГ. Источник питания ДГ также должен иметь малое внутреннее сопротивление.

Для эффективного использования режима генератора тока ИЛ следует включать непосредственно в цепь ДГ без делителей или согласующих элементов. Параметром качества ДГ является величина

$$\eta = \delta I/I_t = (I_t - I_r)/I_t,$$

где I_t — пороговый (максимальный) ток ДГ, I_r — остаточный (минимальный) ток.

В GaAs диоде теоретически может быть получено $\eta \approx 0.6$; экспериментальные значения $\eta = 0.3–0.5$. Величина δI определяет амплитуду модуляции тока накачки ИЛ. Максимальная глубина модуляции излучения достигается, когда минимальный ток ДГ I_r равен пороговому току ИЛ i_{th} . При таком условии согласованный с

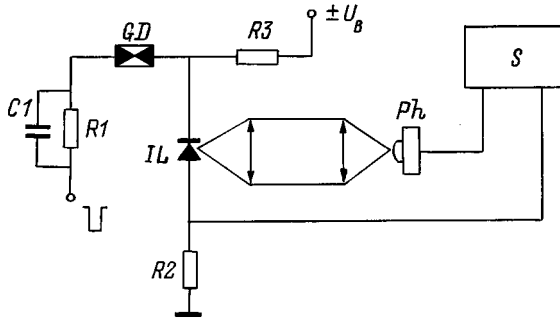


Рис. 1. Схема измерений. Пояснения в тексте.

лазером ДГ обеспечивает накачку ИЛ импульсами тока амплитудой до $2i_{th}$.

В наших экспериментах исследовались серийные ИЛ на основе двойной гетероструктуры с полосковым контактом, в частности типа V-канавки и "погруженный" канал. Типичные характеристики лазеров были следующими: пороговый ток 40–50 мА, максимальная мощность до 10 мВт при токе 90–100 мА, рекомендованная для использования мощность ~ 5 мВт при токе 70 мА. Длины волны излучения 0.85 и 1.3 мкм. При питании от стандартных источников при импульсной модуляции данных лазеров в излучении наблюдались релаксационные автоколебания разной степени выраженности.

Исследовавшаяся схема модуляции (рис. 1) содержит следующие элементы: GD — диод Ганна, IL — инжекционный лазер, зарядная цепочка C1R1 для регулировки напряжения на ДГ, R2 — нагрузочный резистор для контроля тока модуляции, резистор R3 — цепь для подвода к лазеру напряжения постоянного смещения, Ph — фотоприемник, S — двухканальный осциллограф. Электродинамическая система макета модулятора образована копланарной линией, в разрыв которой последовательно включены управляющий ДГ и лазерный диод. Элементы системы размещены на керамической подложке марки 22ХС. В качестве источника смещения цепи ДГ–ИЛ использовался импульсный генератор L-2391 (формирователь на длинной линии с ртутным коммутатором) с выходным сопротивлением 50 Ω. Выходное излучение ИЛ регистрировалось лавинным фотодиодом ЛФД-2. Сигналы с контрольного резистора R2 и с нагрузки фотодиода (50 Ω) наблюдались на стробоскопическом осциллографе С1-70.

Согласование токовых характеристик ДГ и ИЛ осуществлялось выбором подходящих размеров (длина, сечение) кристаллов-заготовок ДГ. Активное сопротивление прямосмещенного ИЛ составляет $R_l \approx 5-10 \Omega$. Мало-сигнальное сопротивление ДГ задавалось в диапазоне 200–250 Ω, так что выполнялось условие $R_0/R_l \geq 20$. Диоды имели планарную конструкцию с торцевыми омическими контактами, изготавливались из эпитаксиального GaAs с концентрацией $n_0 = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и подвижностью $\mu \approx 0.63 \text{ м}^2/\text{Vs}$. Образцы приклеива-

лись поверхностью эпитаксиального слоя на кремниевые подложки с контактами для подключения в схему модулятора. Толщина склейки составляла ~ 0.5 мкм, что обеспечивало теплоотвод и предохраняло поверхность ДГ от пробоя электрическим полем домена. Контакты ДГ изготавливались вжиганием эвтектики Au–Ge, напыленной на торцы кристаллов, по технологии, аналогичной [7]. Типичные размеры кристалла ДГ $100 \times 80 \times 20 \mu\text{м}$ (длина × ширина × толщина); пороговое напряжение ДГ ~ 30 В, пороговый ток ~ 100 мА. На рис. 2 представлена осциллограмма колебаний тока диода 3G38, применявшегося для модуляции ИЛ, полученная в тестовой электродинамической системе при смещении диода импульсами транзисторного формирователя с выходным сопротивлением ~ 8 Ω.

Осциллограммы модуляции в режиме генератора тока в согласованной по току паре ДГ–ИЛ представлены на рис. 3–5. Диод Ганна 3G38 ($R_0 = 240 \Omega$, пороговое напряжение 30 В) в пролетной моде колебаний с частотой 910 МГц генерировал импульсы с параметрами $I_f = 96 \text{ мА}$ и $I_r = 52 \text{ мА}$. Наблюдаемая длительность импульсов тока ~ 0.1 нс (рис. 2). Инжекционный лазер N 29 ($\lambda = 0.85 \mu\text{м}$) имел пороговый ток $i_{th} = 48 \text{ мА}$ и рекомендованную рабочую мощность 5 мВт при токе 67 мА. При увеличении тока до 96 мА выходная мощность проявляла тенденцию к насыщению на уровне 9 мВт. Регулировкой постоянного смещения ИЛ изменялась глубина модуляции излучения и величина нагрузки ДГ. При нулевом и положительном (рис. 3) смещениях в выходном излучении имеется постоянная составляющая, глубина модуляции излучения меньше единицы. Длительность токовых импульсов и глубина модуляции тока ДГ практически не зависят от смещения ИЛ; таким образом, влияние нагрузки в этих случаях незначительно. Для достижения 100% глубины модуляции в цепь смещения ИЛ подавалось напряжение в запорном направлении; таким образом компенсировалось превышение минимального тока ДГ над пороговым током ИЛ. Сопротивление ИЛ и соответственно нагрузка для ДГ при этом возрастали, что отражалось на форме импульсов тока: их длительность и амплитуда несколько увеличивались (рис. 4, 5).

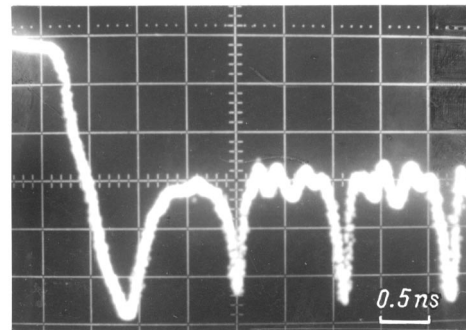


Рис. 2. Тестовая осциллограмма модулирующего диода Ганна (17 мА/div по вертикали, развертка 0.5 нс/div.)

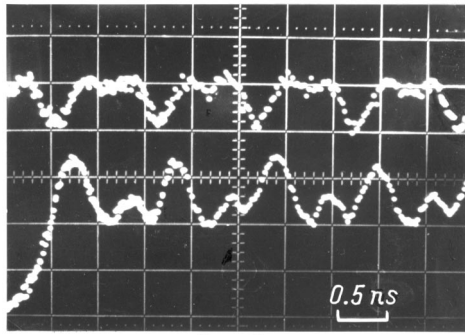


Рис. 3. Верхняя трасса — ток модуляции (23 mA/div), нижняя трасса — отклик фотодиода (60 mV/div).

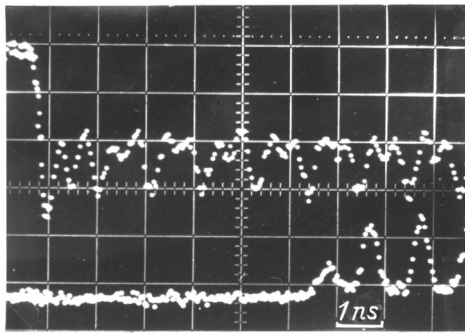


Рис. 4. То же, что и на рис. 3. Развертка 1 ns/div.

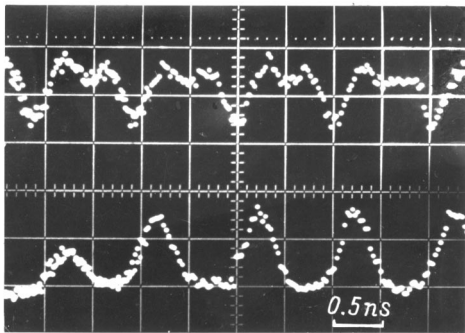


Рис. 5. То же, что и на рис. 3.

Результаты данных экспериментов показывают, что режим генератора тока при модуляции ИЛ в цепи ДГ удовлетворительно выполнялся во всем исследованном диапазоне смещений ИЛ. Смещение регулировалось от -2 (ток ИЛ 15 mA) до $+5$ V запорного напряжения на входе цепи смещения R_3 . Релаксационные колебания в выходном излучении ИЛ отсутствовали, его форма соответствовала форме модулирующего тока. Вторая гармоника в выходном излучении более выражена вследствие большей крутизны ватт-амперной характеристики ИЛ в области малых токов. Наблюдаемые значения длительности оптических импульсов составляют ~ 0.2 ns (время нарастания/спада ~ 0.2 ns). Оценим величину реальной длительности импульсов τ , учитывая время

нарастания переходной характеристики (постоянной времени) фотоприемной системы. Для оценки используем формулу Эльмора [8] $\tau = \sqrt{\tau_0^2 - \tau_p^2 - \tau_s^2}$, где τ_0 — наблюдаемая длительность, τ_p — постоянная времени фотодиода, τ_s — постоянная времени осциллографа. Согласно паспортным данным С1-70, $\tau_s \cong 0.1$ ns. Для фотодиода ЛФД-2 разумная нижняя оценка $\tau_p \geq 0.15$ ns. Тогда для реальной длительности импульса получим $\tau \leq 0.07$ ns.

Режим модуляции импульсами напряжения представлен на рис. 6, 7. В данном режиме использовался более мощный ДГ с пороговым током 1.6 A и $\delta I = 0.7$ A. Необходимый ток накачки подавался на ИЛ через резистивный делитель; в простейшем случае ИЛ шунтировался нагрузочным резистором цепи ДГ R_L величиной от 1 до 4.5 Ω . Режим генератора напряжения выполнялся, так как $R_L \ll R_I$, а ток через R_L стабилизирован диодом Ганна. Было установлено, что при возбуждении релаксаций в выходном излучении лазера наблюдаются также колебания в токе накачки (рис. 6); при этом импульс напряжения на нагрузочном резисторе ДГ (и на цепи ИЛ- R_3) релаксаций не имеет (рис. 7). Поскольку реактивных элементов в схеме деления тока не имеется, то релаксации вызваны внутренними процессами ИЛ [3]. Отметим, что некоторые лазеры не имели релаксационного звона во всех исследовавшихся режимах модуляции.

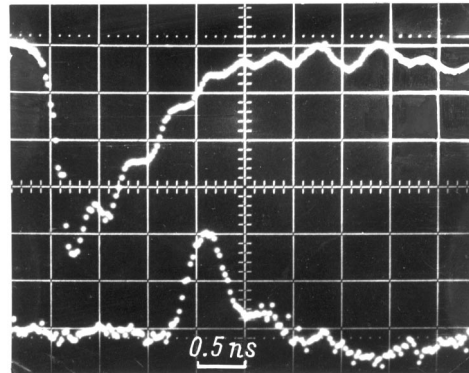


Рис. 6. Верхняя трасса — ток накачки ИЛ (90 mA/div), нижняя трасса — отклик фотодиода (60 mV/div). Развертка 0.5 ns/div.

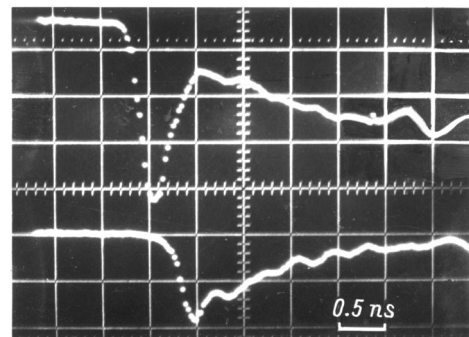


Рис. 7. Верхняя трасса — напряжение на ИЛ (1.2 V/div), нижняя трасса — ток ИЛ (180 mA/div).

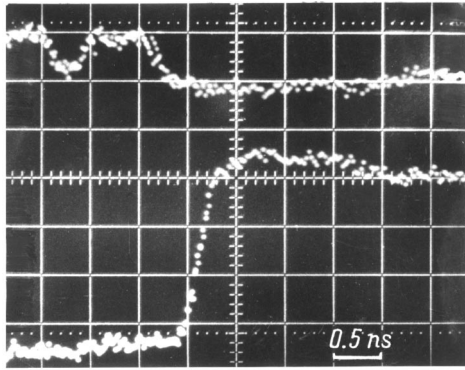


Рис. 8. Верхняя трасса — ток модуляции (23 mA/div), нижняя трасса — отклик фотодиода (60 mV/div). Развертка 0.5 ns/div.

Важной практической задачей является получение ступенчатых оптических импульсов, используемых, например, для исследования переходных характеристик фотоприемников. Модуляция ступенькой тока исследовалась в режиме генератора тока в согласованной цепи ДГ–ИЛ. Ступенька тока получалась посредством срыва генерации ДГ после нескольких регулярных циклов в момент прихода домена на анод. Для срыва использовалась цепочка C1R1, включенная последовательно с ДГ; по мере заряда емкости напряжение на ДГ уменьшалось до уровня несколько ниже порогового. Значение максимального тока при этом практически не меняется, поскольку вольт-амперная характеристика ДГ насыщается в области предпороговых напряжений. Модуляция ступенькой перепада тока δI использовалась для обострения фронта оптического импульса включения ИЛ. Как было установлено, длительность фронта собственного оптического импульса включения определяется в основном параметрами структуры ИЛ; для исследовавшихся лазеров эта величина составляла ~ 0.5 ns. При модуляции ступенькой тока наблюдаемая длительность фронта оптического перепада составляет ~ 0.2 ns (рис. 8). Наблюдаемый оптический сигнал фактически является переходной характеристикой фотоприемной системы, поскольку длительность его фронта практически равна постоянной времени фотоприемной системы (~ 0.18 ns). Оценка истинной длительности фронта перепада дает величину не более 0.07 ns.

Результаты настоящей работы подтверждают перспективность применения ганновских управляющих элементов в интегральных оптоэлектронных устройствах. При модуляции ИЛ импульсами ДГ генератора тока реализуется максимальное собственное быстродействие ИЛ; практически важно также то, что жесткая стабилизация уровней переключения тока ДГ предохраняет ИЛ от повреждения электрическими наводками в цепи питания.

Исследованные режимы модуляции могут использоваться в скоростных оптических передатчиках для измерения собственного {parasitic free} быстродействия ИЛ. На основе согласованной пары ИЛ–ДГ возможно постро-

ение генераторов тестовых оптических сигналов: ступенчатых импульсов (отрицательный или положительный перепад), одиночных или серий коротких импульсов со временем нарастания/спада десятки пикосекунд. Частота следования импульсов может достигать десятков гигагерц при высокой ее стабильности.

Список литературы

- [1] Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975. 288 с.
- [2] Шур М.С. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [3] Полупроводниковые инжекционные лазеры / Под ред. У. Тсанга. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 320 с.
- [4] Thim H.W., Dawson L.R., DiLorenzo J.V. et al. // IEEE Solid State Circuits Conf. Digest of Technical Papers, 1973. P. 92–93.
- [5] Yanai H., Yano M., Kamija T. // IEEE J. Quant. Electron. 1975. Vol. QE-11. P. 519.
- [6] Логинов А.С., Сенаторов К.Я., Соловьев В.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 24. С. 1326–1330.
- [7] Yokoyama N., Ohkawa S., Ishikawa H. // Jap. J. Appl. Phys. 1975. Vol. 4. N 7. P. 1071–1072.
- [8] Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Сов. радио, 1976. 480 с.