

07;09;12

## **Оптически управляемый полупроводниковый модулятор микроволнового излучения с наносекундным быстродействием**

© М.Л. Кулыгин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Родин

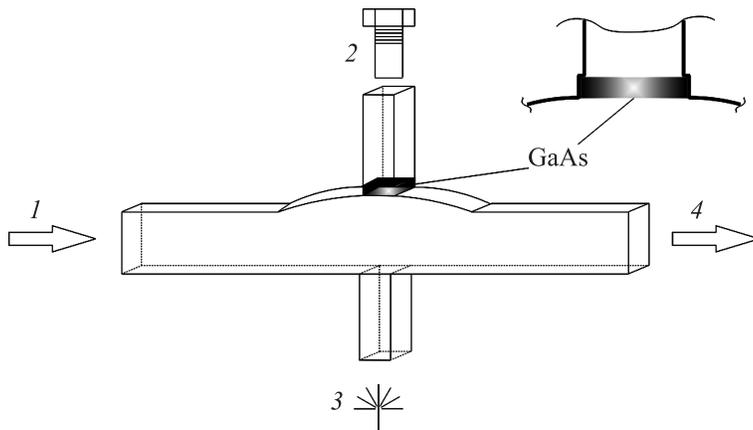
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: kmaxim@appl.sci-nnov.ru*Поступило в Редакцию 1 декабря 2010 г.*

Теоретически исследован, изготовлен и испытан модулятор СВЧ-излучения, управляемый импульсами оптического лазерного излучения. Приведены результаты численных расчетов (методом конечных разностей) и конструктивные параметры модулятора, продемонстрировано их соответствие результатам эксперимента. Быстродействие модулятора составило 1 ns, характерная энергия управляющего лазерного импульса, достаточная для оптимального переключения, равнялась 10 nJ, диапазон механической перестройки по частоте СВЧ-излучения составил примерно 10% (66–72 GHz). Экспериментально продемонстрировано сохранение работоспособности модулятора в широких пределах изменения параметров управляющего лазера.

В настоящее время среди перспективных областей применения СВЧ-излучения миллиметрового диапазона длин волн значительное место занимают управляемый термоядерный синтез, ускорение заряженных частиц и активная когерентная спектроскопия [1]. При использовании СВЧ-излучения возникают проблемы его коммутации, требующие:

- быстродействия переключения вплоть до наносекунд,
- когерентности отдельных пакетов импульсов между собой,
- охвата частотных диапазонов по СВЧ в десятки-сотни гигагерц.

Данное исследование направлено на практическую реализацию совокупности указанных требований. На рис. 1 представлена схема полупроводникового модулятора. Резонатор, представляющий собой симметричный участок плавного уширения прямоугольного волновода, заключен между отрезками одномодового волновода стандартного



**Рис. 1.** Структурная схема модулятора: 1 — вход СВЧ, 2 — винт перестройки частоты, 3 — управляющий лазерный импульс, 4 — выход СВЧ.

сечения  $3.6 \times 1.8$  mm, на концах которых расположены вход и выход коммутируемого СВЧ-излучения. В средней части резонатора имеются два отверстия для связи собственных волн с поперечными индексами 1 и 3 прямоугольного волновода, к которым присоединены отрезки закритического волновода. В основании верхнего по схеме отверстия установлена пластина из полупроводника, которая освещается лазером через нижнее отверстие и меняет свойства из-за фотопроводимости. В верхнем отрезке закритического волновода установлен корректирующий винт для перестройки частот собственных колебаний резонатора. Резонатор с включенной в него пластиной из полупроводника работает аналогично полосовому режекторному фильтру [2], ослабляя проходящий СВЧ-сигнал на выбранной частоте примерно на 40 dB. При освещении пластины лазером добротность и центральная частота резонатора изменяются, при этом ранее ослабляемый СВЧ-сигнал проходит через резонатор без изменений.

В качестве полупроводникового материала выбран нелегированный арсенид галлия (GaAs). Используемый образец полупроводника при частотах СВЧ-излучения около 70 GHz обладает диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 12.96$  и малым тангенсом угла омических потерь

около  $10^{-4}$ . При освещении лазером концентрация носителей заряда быстро возрастает до значений  $10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  в приграничном слое глубиной порядка  $1 \mu\text{m}$  [3], коэффициент отражения СВЧ-излучения от такого полупроводника близок к единице. Выбор арсенида галлия обусловлен его характерным временем релаксации носителей заряда порядка 1 ns. Полученная таким образом резонансная система (рис. 1) с образцом арсенида галлия обладает добротностью около 500, на рабочих частотах имеет собственное время примерно 1 ns и обеспечивает глубину модуляции (разницу между „открытым“ и „закрытым“ состояниями, по аналогии с полупроводниковым транзистором) примерно 40 dB. При подключении к входу модулятора источника когерентного СВЧ-излучения, в режиме стабилизации фазы, все импульсы на выходе модулятора связаны по фазе, при этом спектр выходного сигнала весьма широк. Данное свойство является особенно ценным для когерентной спектроскопии, позволяя добиться высокого разрешения при сканировании объектов за счет сложения энергии отдельных импульсов в фазе на входе приемника спектроанализатора.

Используемая в работе численная модель устройства основана на двумерном по координате методе FDTD для системы уравнений Максвелла (1a, 1b) с электрическим током, выраженным через суммарную подвижность обобщенных носителей заряда  $\mu$  в полупроводнике и их концентрацию  $N$  (1c):

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1a)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (1b)$$

$$\vec{j} = eN(t, \vec{r})\mu\vec{E}. \quad (1c)$$

Здесь скорость света  $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$ , заряд электрона  $e = 4.8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$ , суммарная подвижность носителей заряда в полупроводнике в приближении слабого электрического поля  $\mu = 8.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  [3].

Для расчета суммарной концентрации обезличенных носителей заряда в полупроводнике используется нестационарное модельное уравнение, описывающее эффекты диффузии, релаксации и возбуждения

фотопроводимости внешним оптическим излучением:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\Delta N + g(\vec{r}, t) - G_1(N - N_p). \quad (2)$$

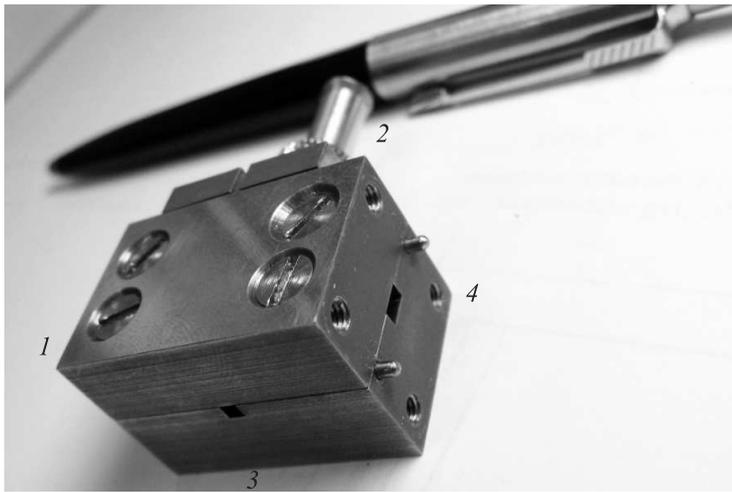
Здесь коэффициент амбиполярной диффузии в полупроводнике  $D = 28 \text{ cm}^2/\text{s}$  [3], коэффициент релаксации первого порядка (играющей основную роль, подобранной экспериментально)  $G_1 = 10^{10} \text{ cm}^{-1}$ , равновесное значение концентрации носителей в используемом образце арсенида галлия при комнатной температуре  $N_p = 2.1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$  [3]. На границе полупроводника выполняются условия отсутствия потока  $\nabla N = 0$ . Внутренний фотоэффект, т.е. возрастание во времени концентрации носителей заряда, при поглощении света веществом, с учетом затухания излучения лазера в глубь полупроводника, описывается уравнением (3):

$$g(r_{\perp}, t) = I \exp(-\alpha r_{\perp}) \theta(t - t_0, \tau). \quad (3)$$

Константа фотоэффекта выражается следующим образом:  $I = \frac{\alpha W_{imp} \eta}{S \tau W_q}$ , где обратная глубина проникновения  $\alpha = 10\,000 \text{ cm}^{-1}$  соответствует характерной ширине слоя фотопроводимости в арсениде галлия  $1 \mu\text{m}$  при длине волны лазерного излучения  $770 \text{ nm}$ ,  $W_{imp}$  — энергия лазерного импульса,  $W_q$  — энергия кванта,  $\tau$  — длительность импульса,  $\theta$  — степ-функция,  $r_{\perp}$  — расстояние до поверхности полупроводника. Площадь пучка  $S$  составляет  $4 \text{ mm}^2$ ,  $\eta$  — КПД фотоэффекта на практике составляет около 70%.

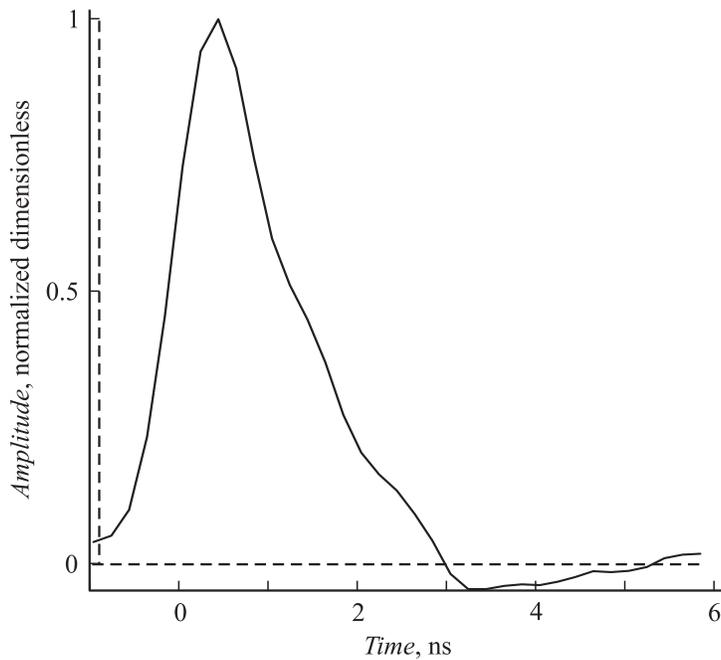
В работе используется модификация метода конечных разностей во временной области FDTD [4], включающая в себя граничные условия излучения UPML [5]. Пространственный шаг сетки составляет  $25 \mu\text{m}$ , в области слоя фотопроводимости в полупроводнике —  $0.1 \mu\text{m}$ , этого достаточно для адекватного описания резких изменений концентрации в большинстве случаев. Базовый временной шаг сетки составляет  $117 \text{ fs}$  (соответствует значению Куранта 0.99). Для адекватного описания быстрых процессов изменения концентрации в процедуре интегрирования уравнения (2) текущий шаг по времени адаптивно уменьшается с целью сохранения малости приращения концентрации на каждой итерации  $dN \ll N$ . В процессе теоретических исследований подобрана оптимальная по глубине модуляции геометрия.

Фотография испытанного образца модулятора представлена на рис. 2, размер образца по наибольшей из сторон составляет около 3 см.



**Рис. 2.** Фотография действующего макета модулятора СВЧ-излучения 66–72 GHz: 1 — вход СВЧ, 2 — винт перестройки частоты, 3 — вход управляющего лазерного импульса, 4 — выход СВЧ.

В данной работе произведены несколько серий экспериментов. На вход модулятора, через направленный ответвитель для подавления отраженного сигнала, с перестраиваемого генератора СВЧ подается волна  $TE_{10}$  прямоугольного волновода частотой 60–80 GHz. СВЧ-сигнал с выхода модулятора детектируется полупроводниковым диодом. Выход детектора зашунтирован резистором сопротивлением  $50 \Omega$  для обеспечения быстродействия детектирования не хуже 1 ns. Электрический сигнал регистрируется цифровым осциллографом Tektronix (США) с полосой пропускания по частоте 500 MHz и частотой выборки  $5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ . В экспериментах используется лазер производства Spectra-Physics (США), состоящий из титан-сапфирового лазера Tsunami с диодной накачкой Millennia VsJ и титан-сапфирового усилителя Spitfire Pro с накачкой Empower. Лазер Tsunami имеет параметры выходных импульсов: длительность 50–100 fs, длина волны 750–830 nm, частота повторения 75.4 MHz, средняя мощность 500 mW (энергия в импульсе  $\sim 10 \text{ nJ}$ ). В случае подключения усилителя Spitfire Pro частота повторения выходных импульсов снижалась до 1 kHz, а средняя



**Рис. 3.** Осциллограммы выходного сигнала модулятора и управляющего лазерного импульса: пунктирная линия — управляющий лазерный импульс длительностью 100 fs, сплошная линия — выходной сигнал модулятора („отклик“ резонатора: фронт  $\sim 1$  ns, спад  $\sim 2$  ns).

мощность возрастала до 2.5 W (энергия в импульсе — до 2.5 mJ). С помощью оптического параметрического усилителя TOPAS-C имеется возможность увеличения длины волны выходного импульса Spitfire Pro до  $2 \mu\text{m}$ . В проведенных экспериментах модулятор продемонстрировал работоспособность в диапазоне энергий в каждом импульсе от 7 pJ до 250  $\mu\text{J}$ . Осциллограмма типичного выходного СВЧ-отклика модулятора на лазерный импульс представлена на рис. 3. Лазерный импульс изображен пунктиром. Он имеет длительность около 100 fs, неразрешимую в наносекундном масштабе оси времени, поэтому его осциллограмма выглядит как вертикальная прямая линия. Сплошной линией на графике представлена осциллограмма отклика детектора, подключенного к вы-

ходу модулятора. При подаче импульса лазерного излучения нормально закрытый модулятор начинает открываться в течение примерно 1 ns, затем его выходной сигнал затухает с характерным временем около 2 ns. Таким образом, получен типичный режим работы модулятора — серия импульсов СВЧ-сигнала на выходе, с центральной частотой около 70 GHz, с частотой повторения 75.4 MHz (период 13.6 ns) и характерной шириной импульса порядка 1 ns. Работоспособность модулятора наблюдалась при длинах волн лазерного излучения от 730 nm до 2  $\mu$ m. Также продемонстрированы широкие возможности по механической перестройке рабочей частоты СВЧ-модулятора — не менее 10% в диапазоне от 66 до 72 GHz.

Авторы выражают благодарность Б.В. Шишкину и И.Е. Илякову за помощь в экспериментах с лазером, а также В.Я. Алешкину за ценные замечания и стимулирующие дискуссии.

## Список литературы

- [1] *Herlel M.H., Denysenkov V.P., Bennati M., Prisner T.F.* // Magnetic Resonance in Chemistry. 2005. V. 43. P. 248.
- [2] *Denisov G.G., Kuzikov S.V., Lukovnikov D.A.* // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 7. P. 1231.
- [3] *Madelung O.* Semiconductors. Data Handbook: Springer, 2003. 2486 p.
- [4] *Taflove A.* Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston MA: Artech House, 1995.
- [5] *Gedney S.D.* // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1996. V. 44. N 12. P. 1630.