

06;07

## **Быстродействующий квазиоптический переключатель фазы волнового пучка, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии**

© А.А. Вихарев, Г.Г. Денисов, Вл.В. Кочаровский,  
С.В. Кузиков, В.В. Паршин, Н.Ю. Песков,  
А.Н. Степанов, Д.И. Соболев, М.Ю. Шмелёв

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
E-mail: alvikharev@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2007 г.

Предложен СВЧ-коммутатор, активный элемент которого представляет собой металлическое зеркало с помещенной на его поверхность пластиной полупроводника. Переключение фазы волнового пучка достигается за счет создания в полупроводнике проводящего слоя лазерным излучением с энергией кванта, примерно равной ширине запрещенной зоны. С использованием диска из высокочистого кремния, облучаемого импульсным титан-сапфировым лазером, проведено экспериментальное исследование 180°-го переключателя фазы гауссова волнового пучка на частоте 30 GHz. На низком уровне СВЧ-мощности показано эффективное переключение фазы пучка за время, составляющее несколько наносекунд.

PACS: 41.20.-q, 42.62.-b, 72.40.+w

1. Одной из областей применения быстрых коммутаторов излучения сантиметрового диапазона является создание мощных компрессоров импульсов мультимегаваттного уровня мощности [1–3]. В таких системах для компрессии необходима фазовая модуляция СВЧ-импульса в виде скачкообразного переброса фазы на 180°. При этом для обеспечения высокой эффективности время, требуемое для переключения фазы, должно быть много меньше длительности самого импульса, которая обычно составляет  $10^2$ – $10^3$  ns.

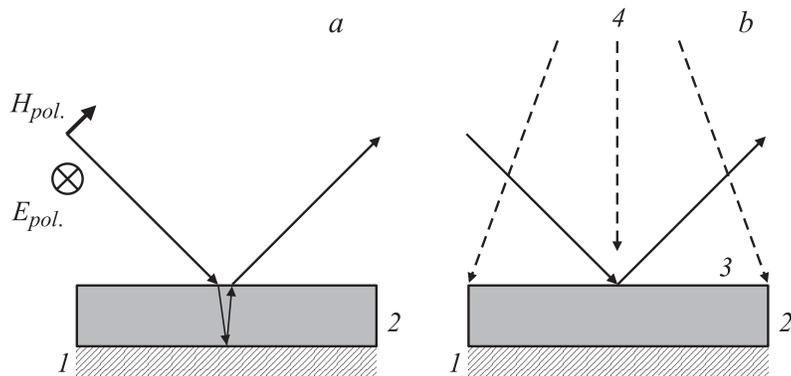
Последнему требованию можно удовлетворить, применяя в качестве СВЧ-ключа высокочистый кремний ( $\text{tg}(\delta) \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  на 30 GHz при 290 K). Он может быть переведен в проводящее состояние лазерным излучением титан-сапфирового лазера с длиной волны 795 nm, т.е. с энергией кванта 1.56 eV, примерно на треть превышающей ширину запрещенной зоны в кремнии — 1.124 eV при комнатной температуре. При характерной концентрации носителей  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , соответствующей уже хорошо проводящему состоянию кремния, толщина скин-слоя для СВЧ-излучения составляет величину  $\sim 10 \mu\text{m}$ , и именно в таком слое за требуемое время, не превышающее 10 ps, должны быть созданы свободные носители. Считая для оценки, что каждый фотон рождает свободный электрон в зоне проводимости и дырку в валентной зоне, при площади пластины порядка  $100 \text{ cm}^2$  получаем, что требуется лазерный импульс умеренной энергии  $\sim 10 \text{ mJ}$  и мощности  $\geq 1 \text{ MW}$ .

Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниковой плазме происходит за времена порядка одной миллисекунды в чистом кремнии и порядка микросекунды в легированном кремнии. Это значение определяет верхнюю границу допустимых длительностей СВЧ-импульсов.

При использовании твердотельных ключей в системах компрессии на высоком уровне СВЧ-мощности естественно применять квазиоптические коммутаторы в вакууме, работающие на волновых пучках с поперечными размерами, большими в сравнении с длиной волны. Такие пучки, передаваемые с помощью зеркал, позволяют максимально распределить СВЧ-мощность по поперечному сечению и, следовательно, снизить действующие поля на активном элементе, тем самым обезопасив его от пробоя.

Для переключения фазы пучка пластина полупроводника помещается на проводящее зеркало. В таком случае в пренебрежении потерями внутри кремния в результате создания слоя фотопроводимости может изменяться лишь фаза отраженного от зеркала сигнала за счет изменения положения эффективной плоскости отражения.

2. Для предварительного вычисления изменения фазы широкоапертурного гауссова пучка при отражении от пластины полупроводника на проводящей подложке при возникновении фотопроводимости воспользуемся приближением плоской волны, а также будем считать, что возникающий слой близок к идеальному проводнику (рис. 1). В этом приближении отношение коэффициентов отражения до „металлиза-



**Рис. 1.** Принцип переключения фазы волнового пучка (сплошные линии) при облучении кремния лазерным импульсом (пунктирные линии): 1 — металлическое зеркало, 2 — кремниевый диск, 3 — проводящий слой, 4 — пучок лазера.

ции“  $R^{(2)}$  и после нее  $R^{(1)}$  дается формулами:

$$\frac{R_E^{(2)}}{R_E^{(1)}} = \frac{k_2 \cos(k_2 l) + ik_1 \sin(k_2 l)}{k_2 \cos(k_2 l) - ik_1 \sin(k_2 l)} \quad (1)$$

для случая  $E$ -поляризации и

$$\frac{R_H^{(2)}}{R_H^{(1)}} = \frac{k_1 \cos(k_2 l) + ik_2 \sin(k_2 l)}{k_1 \cos(k_2 l) - ik_2 \sin(k_2 l)} \quad (2)$$

для случая  $H$ -поляризации соответственно, где  $k_2 = k \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$ ,  $k_1 = k \cos \theta$ ,  $\theta$  — угол падения,  $l$  — толщина пластины,  $\varepsilon$  — ее диэлектрическая проницаемость в отсутствие свободных носителей,  $k = \omega/c$  — волновое число в вакууме. Как следует из анализа формул (1) и (2), для обеих поляризаций требуемое изменение фазы на  $180^\circ$  при переключении достигается при одной и той же толщине

пластины полупроводника:

$$l_{opt} = \frac{\pi(1+2n)}{2k_2} = \frac{\lambda(1+2n)}{4\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}, \quad (3)$$

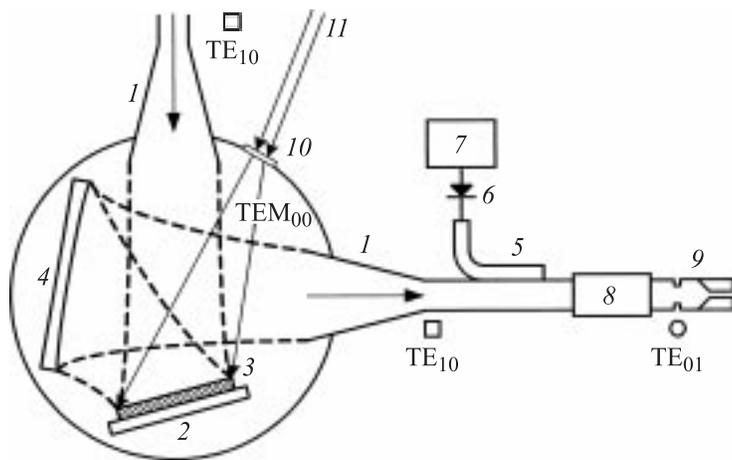
где  $\lambda$  — длина волны в вакууме,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . В частности, при  $\theta = 22.5^\circ$ ,  $\omega/2\pi = 30$  GHz и  $\varepsilon = 11.7$  для кремния удобно взять  $n = 1$ , что дает толщину пластины  $l = 2.2$  mm. Пластины такой толщины использовались в эксперименте. При этой толщине учет потерь в кремнии до „металлизации“ при  $\text{tg}(\delta) \sim 3 \cdot 10^{-6}$  дает уменьшение величины отражения по мощности на величину  $10^{-4}$ .

Более детальный расчет поглощения и фазы отражения при создании проводящего слоя возможен с привлечением реального значения концентрации носителей в слое, соответствующем глубине проникновения лазерного излучения. Такой расчет был выполнен на основе модели сильностолкновительной плазмы (см., например, [4]), согласно которой комплексная диэлектрическая проницаемость в проводящем слое может быть выражена через концентрацию носителей  $N_e$  и частоту их столкновений  $\nu$ :

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon + i \frac{4\pi N_e e^2}{\omega m_e \nu}, \quad (4)$$

где  $m_e$  и  $e$  — масса и заряд электрона соответственно. Расчеты по этой модели при толщине проводящего слоя  $10 \mu\text{m}$ , соответствующей глубине проникновения лазерного излучения с длиной волны  $795$  nm в кремний [3], показали, что изменение фазы отражения близко к  $180^\circ$  (с точностью  $10^\circ$ ) уже начиная с концентраций  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Однако приемлемые потери из-за поглощения (менее 3.5%) достигаются лишь при концентрациях, в десять раз больших указанного значения.

3. Коммутатор на частоту 30 GHz был изготовлен в виде  $90^\circ$  уголка, на плоское медное зеркало которого диаметром 10 см прикреплялся кремниевый диск (рис. 2). Полные размеры уголка составляют  $50 \times 50 \times 20$  см. Вход и выход реализованы на основной моде волновода сечением  $7.2 \times 3.4$  mm. Гауссов волновой пучок формировался с помощью рупоров и передавался от одного рупора к другому при помощи вспомогательного фокусирующего зеркала. Измеренный коэффициент передачи через уголок на рабочей частоте 30 GHz в непереключенном состоянии составил 95%.



**Рис. 2.** Схема уголка с измерительным трактом: 1 — рупор, 2 — плоское медное зеркало, 3 — кремниевый диск, 4 — фокусирующее медное зеркало, 5 — направленный ответвитель, 6 — детектор, 7 — осциллограф, 8 — преобразователь Марье, 9 — тестовый резонатор с регулировочным поршнем, 10 — линза, 11 — пучок лазера.

Кремний был легирован золотом с целью уменьшения внутренних потерь. После легирования по величине потерь ( $\text{tg } \delta \sim 3 \cdot 10^{-6}$ , 290 К) получаемый материал приближается по уровню потерь к собственному кристаллическому кремнию [5].

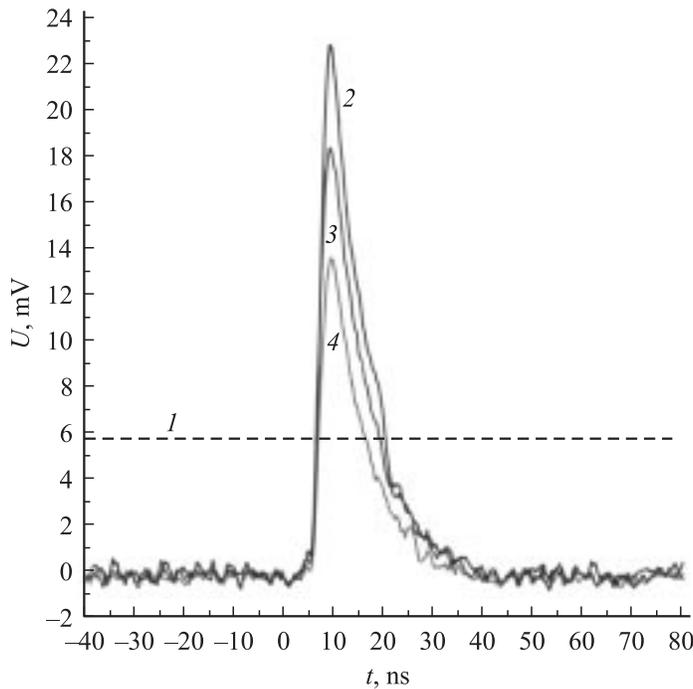
Для проверки работы переключателя использовалось оптическое излучение, получаемое с помощью лазерного комплекса на кристаллах Ti:Sa тераваттного уровня мощности [6]. В основе достижения такого уровня мощности лежит принцип усиления и последующего сжатия растянутых во времени частотно-модулированных лазерных импульсов. Накачкой для лазерного комплекса на кристаллах Ti:Sa служит излучение второй гармоники Nd:YAG лазера с длиной волны 532 nm. Лазер характеризуется параметрами: длительность импульса 70–80 fs, энергия в импульсе  $W = 0.1\text{--}10\text{ мДж}$ , мощность  $P \sim 1\text{ ТВт}$  и частота повторения 10 Hz. Тот же комплекс использовался и для генерации импульсов с длительностью 10 ns с близкой энергетикой. Для этого комплекс из режима усиления фемтосекундных импульсов

мог быть переведен в режим генерации. Диаметр пучка на выходе лазерной системы  $d \approx 10$  mm, поэтому для эффективного равномерного освещения диска кремния использовалась дефокусирующая линза с просветляющим покрытием.

4. С целью экспериментальной проверки переключения фазы на  $180^\circ$  была предложена схема измерений, основанная на моделировании компрессии с помощью диагностического резонатора (рис. 2). Непрерывное излучение генератора на частоте 30 GHz проходило через уголок и с помощью преобразователя Марье питало диагностический резонатор на осесимметричной моде  $Te_{011}$ . Резонатор представлял собой полый цилиндр, полностью закрытый для излучения за критическим сужением с одной стороны и имеющий отверстие связи со стороны уголка. Нагруженная добротность составила  $Q_1 = 2000$  при равенстве собственной добротности  $Q_0$  и дифракционной добротности  $Q_c$ , определяемой отверстием связи,  $Q_0 = Q_c = 4000$ .

Эффект компрессии можно пояснить, представив отражение как интерференцию отраженного непосредственно от диафрагмы резонатора потока мощности и потока, вытекающего из резонатора. В стационарном состоянии эти потоки находятся в противофазе. В случае быстрого в масштабе времени затухания рабочего колебания  $\tau = Q_1/\pi f$  и изменения на  $180^\circ$  фазы падающего на резонатор потока мощности успевает измениться лишь фаза отражения от диафрагмы, так что взаимное гашение потоков сменяется суммированием, что дает „выплеск“, длительность которого обратно пропорциональна нагруженной добротности. Относительная величина выплеска  $G$  зависит от соотношения нагруженной и дифракционной добротности  $Q_1/Q_c$  тестового резонатора, и ее максимально возможное значение  $G = 9$  достигается при  $Q_1/Q_c = 1$ , при  $Q_1/Q_c = 0.5$  имеем  $G = 4$  [1]. Последний случай, соответствующий практически согласованному (безотражательному) до момента переключения резонатору, был реализован в эксперименте.

5. При тестировании коммутатора отраженный от тестового резонатора сигнал регистрировался при помощи направленного ответвителя с детектором. На рис. 3 показаны типичные полученные осциллограммы отраженного от тестового резонатора сигнала при различных значениях энергии лазерного импульса. На этих осциллограммах момент прихода фемтосекундного лазерного импульса совпадает с передним, более резким, фронтом выплеска. Из осциллограмм видно, что происходит изменение фазы на  $180^\circ$ , о чем свидетельствует увеличение амплитуды



**Рис. 3.** Оциллограммы сигнала, отраженного от диагностического резонатора, при энергиях лазерного импульса 8 мДж (2), 5 мДж (3) и 2 мДж (4), 1 — уровень падающего сигнала.

отраженного сигнала примерно в 4 раза ( $G \approx 4$ ). В эксперименте наблюдалось насыщение скомпрессированного сигнала при превышении энергии лазерного импульса  $> 5$  мДж, что свидетельствует о достаточной металлизации проводящего слоя в кремнии.

Использование лазерных импульсов наносекундной длительности ( $\sim 10$  нс) приводило к качественно схожим результатам. Однако пиковое значение выплесков оказывалось немного ниже (на 20–25%) в сравнении с теми значениями, что были получены при той же энергетике, но в лазерных импульсах фемтосекундной длительности, поскольку время лазерного импульса сравнимо с временем СВЧ-высвечивания из резонатора.

6. Проведенный эксперимент показал возможность эффективной (с точки зрения задач компрессии) коммутации фазы СВЧ-импульсов длительностью  $10^2$ – $10^3$  ns при помощи дисков кремния, облучаемых лазерными импульсами с энергией 5–10 мДж. Тестирование коммутатора на высоком уровне СВЧ-мощности ( $\sim 100$  MW) планируется провести на стенде STF3 в ЦЕРНе на мощном компрессоре импульсов SLED-II.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-08-08199-ОФИ.

## Список литературы

- [1] *Farkas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B.* // Proc. of 9<sup>th</sup> International Conference on High Energy Accelerator. Stanford, California, 1974. P. 576.
- [2] *Tantawi S.G., Dolgashev V.A., Nantista C.D.* // Proc. of LINAC2004. Lubeck, Germany, 2004. P. 852.
- [3] *Syratchev I., Denisov G., Kocharovsky V.I., Kuzikov S., Stepanov A.* Optically Controlled 30 GHz High Power Active RF Phase Switch for the CTF3 RF Pulse Compressor. CLIC-Note-645. Geneva, Switzerland, CERN OPEN-2005-026.
- [4] *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 450 с. Т. 2. 449 с. (Sze S.M. Physics of semiconductor devices. New York: John Wiley & Sons Inc., 1981).
- [5] *Андреев Б.А., Паршин В.В., Шмагин В.Б., Котерева Т.П., Heidinger R.V.* // Неорганические материалы. 1997. Т. 33. № 11. С. 1–4.
- [6] *Степанов А.Н., Бабин А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 7. С. 623–626.