

## ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ НА ФОТООТКЛИК КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ИМПУЛЬСАЦИИ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

С. Ашмонтас, И. Градаускас, Э. Ширмулис

Институт физики полупроводников, 232600, Вильнюс, Литва  
(Получена 25 января 1993 г. Принята к печати 9 марта 1993 г.)

Исследована кинетика импульса фототока, текущего через  $p-p^+$ -переход, в кремнии при освещении импульсом излучения СО<sub>2</sub>-лазера. Установлено, что при температуре жидкого азота фотоотклик обусловлен не только разогревом дырочного газа и кристаллической решетки, но и изменением концентрации носителей заряда из-за их генерации с примесных уровней. Показано, что температурная зависимость изменения удельного сопротивления образца при воздействии излучением лазера связана с деионизацией примеси. Экспериментально установлено, что при достижении определенного уровня мощности лазерного излучения процесс генерации носителей заряда с примесных уровней начинает насыщаться.

При воздействии на кристаллы кремния излучением СО<sub>2</sub>-лазера, величина энергии кванта которого ( $\hbar\omega = 0.12$  эВ) значительно меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, наиболее эффективным механизмом поглощения света является внутризонное поглощение свободными носителями заряда [1]. При описании фотоэлектрических свойств полупроводника обычно предполагают, что концентрация носителей заряда остается постоянной, а изменяется их распределение по импульсу и энергии [2, 3]. Такая ситуация может экспериментально реализоваться лишь в том случае, когда отсутствует примесное поглощение. Когда энергия ионизации легирующей примеси меньше энергии кванта ИК излучения, при низких температурах наряду с внутризонным поглощением света будет наблюдаться и примесное поглощение. Это приведет к изменению не только энергии свободных носителей заряда, но и их концентрации. Именно такая ситуация должна наблюдаться в кремнии, легированном бором или фосфором, при низких температурах, когда примесные уровни не полностью ионизированы.

В настоящей работе исследуются фотоэлектрические свойства кремниевых структур при освещении их импульсами СО<sub>2</sub>-лазера, когда наряду с разогревом свободных носителей заряда происходит изменение их концентрации.

Исследуемые  $p-p^+$ -переходы создавались путем диффузии бора при температуре 1200 °С в течение 10 мин в пластины  $p$ -Si с удельным сопротивлением 10 Ом·см. При этом концентрация дырок в  $p^+$ -области составляла  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Омические контакты создавались термическим напылением алюминия с последующим его отжигом при температуре 560 °С в атмосфере аргона. Освещение перехода осуществлялось импульсами СО<sub>2</sub>-лазера [4] через окно, открытое в металлическом покрытии, являющемся контактом к  $p^+$ -области. Об отсутствии влияния металлических контактов на фотоотклик свидетельствовал тот факт, что при освещении образца со стороны подложки были получены аналогичные результаты. Схема измерения фотоотклика представлена на рис. 1, а.

Осциллограммы фотоотклика, снятые при комнатной температуре кристаллической решетки, представлены на рис. 1, б. При нулевом смещении ( $V=0$ ) фотоотклик аналогичен полученному в работе [3], т. е. обусловлен

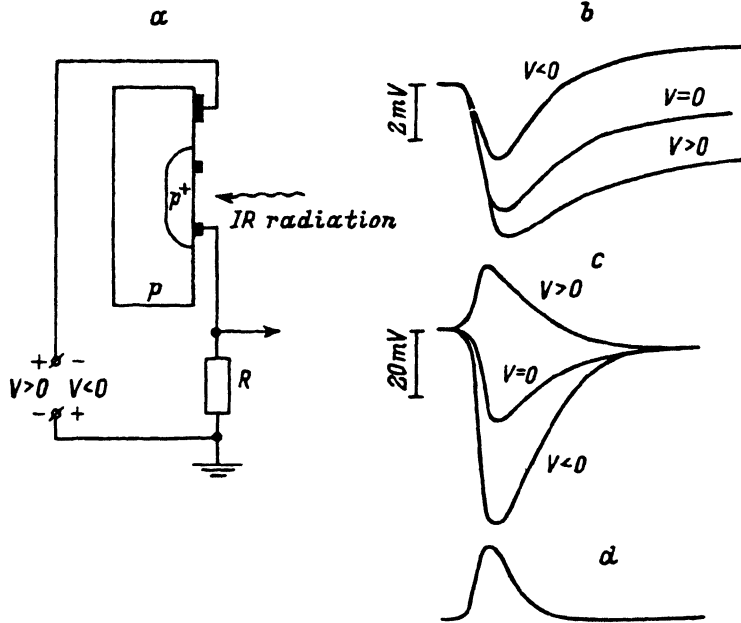


Рис. 1. Схема измерения (а), осциллограммы фотоотклика кремниевой структуры (b, c) и форма импульса лазера (d).  $T_0$ , К: b — 300, c — 80.  $R = 200$  Ом.  $|V| = 4.5$  В.

разогревом дырочного газа светом (быстрая часть импульса) и разогревом решетки (медленная часть). Вследствие разогрева решетки ИК излучением увеличивается удельное сопротивление образца. Поэтому при постоянном смещении  $V$  наблюдается уменьшение постоянного тока, текущего через образец при освещении его импульсом  $\text{CO}_2$ -лазера. В зависимости от полярности постоянного смещения импульс, обусловленный изменением постоянного тока, либо вычитается из импульса фотоотклика ( $V < 0$ , отрицательный потенциал приложен к базовому контакту образца), либо складывается с ним ( $V > 0$ ).

Совсем иная картина наблюдается при температуре жидкого азота (рис. 1, c). В случае  $V < 0$  суммарный импульс фотоотклика увеличивается при приложении внешнего смещения, а при  $V > 0$  он уменьшается и даже меняет полярность при больших внешних смещениях. На рис. 2 представлены осциллограммы фотоотклика при различных плотностях мощности лазерного излучения. Анализ этих осциллограмм позволяет сделать вывод, что фотоотклик состоит по крайней мере из трех составляющих, обусловленных: 1) разогревом кристаллической решетки образца, 2) разогревом свободных носителей заряда и 3) изменением концентрации носителей заряда.

О наличии разогрева кристаллической решетки образца свидетельствует медленная составляющая фотоотклика с продолжительностью в несколько десятков мкс.

О наличии разогрева свободных носителей заряда при освещении структур  $p-p^+$ -Si импульсом  $\text{CO}_2$ -лазера, как отмечалось в [3], свидетельствуют форма и полярность фотоотклика в отсутствие внешнего постоянного смещения (рис. 1).

Положительная часть фотоотклика (рис. 1, c, 2, a) указывает на увеличение постоянного тока, текущего через образец, т. е. на уменьшение удельного сопротивления образца при освещении. Быстрый ход этой составляющей, а также ее полярность приводят к предположению, что в данном

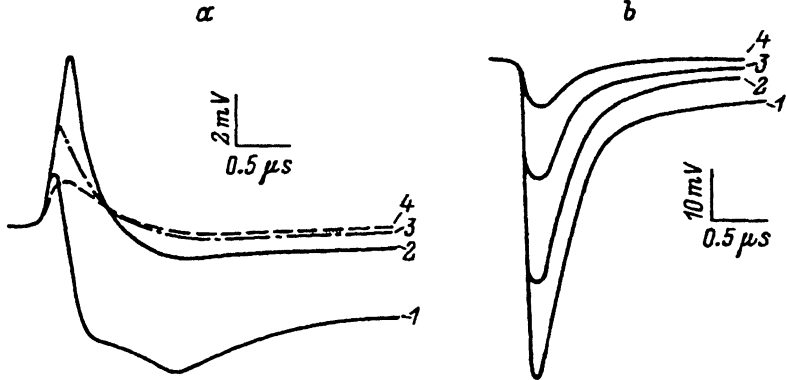


Рис. 2. Осциллограммы фотоотклика при  $V > 0$  (а) и  $V < 0$  (б). Плотность мощности лазерного излучения  $P$ ,  $\text{МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ : 1 — 1.43, 2 — 0.47, 3 — 0.16, 4 — 0.07.  $T_0 = 80 \text{ K}$ .  $R = 200 \text{ Ом}$ .  $|V| = 1.5 \text{ В}$ .

случае имеет место генерация свободных носителей заряда с примесных уровней.

Для проверки этого предположения нами были проведены измерения электропроводности  $p$ -Si (удельное сопротивление  $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) при освещении излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Узкая часть монокристаллического образца (рис. 3, вставка) освещалась импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера с плотностью мощности излучения  $1.2 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ . Импульс фотоотклика измерялся на нагрузочном сопротивлении  $50 \text{ Ом}$ .

Как видно из рис. 3 (см. вставку), при комнатной температуре форма импульса фотоотклика (осциллограмма б) существенно отличается от формы импульса  $\text{CO}_2$ -лазера (осциллограмма а). Длительность переднего фронта импульса фотоотклика достигает примерно  $0.5 \text{ мкс}$ , т. е. практически равна длительности импульса лазера, а время спада равно  $30\text{—}40 \text{ мкс}$ . Полярность фотоотклика соответствует увеличению сопротивления образца при освещении его импульсами лазера. Данный экспериментальный факт можно объяснить разогревом кристаллической решетки, так как с ростом температуры кристаллической решетки  $T_0$  удельное сопротивление образца увеличивается [<sup>5-6</sup>].

С понижением  $T_0$  в импульсе фотоотклика появляется быстрая составляющая, форма которой практически повторяет форму импульса лазера, а полярность указывает на уменьшение сопротивления образца (осциллограмма с на вставке к рис. 3). Температурная зависимость относительного изменения удельного сопротивления образца при освещении  $\rho_0/\rho$ , полученная из результатов измерения амплитуды быстрой составляющей фотоотклика, приведена на рис. 3. На этом рисунке также приведены расчетные зависимости количества ионизированной примеси бора в кремнии от температуры, полученные в работе [<sup>6</sup>]. Сравнение этих 2 кривых указывает на то, что уменьшение удельного сопротивления кремния при освещении импульсом  $\text{CO}_2$ -лазера связано с ростом концентрации свободных носителей заряда за счет генерации их с примесных уровней, если к тому же учесть, что энергия ионизации бора в кремнии  $E_B = 0.045 \text{ эВ}$  [<sup>5</sup>] меньше энергии кванта лазерного излучения.

Измерения вольт-ваттной зависимости фотоотклика показали, что при малых уровнях мощности лазерного излучения величина фотоотклика линейно растет с увеличением мощности (рис. 4). При больших уровнях излучения наблюдается отклонение от линейной зависимости, которое связано с истощением заселенности акцепторных уровней дырками.

На основании этих измерений можно объяснить зависимости фотоотклика от смещения  $p$ - $p^+$ -перехода, представленные на рис. 2. Очевидно, что при  $V < 0$

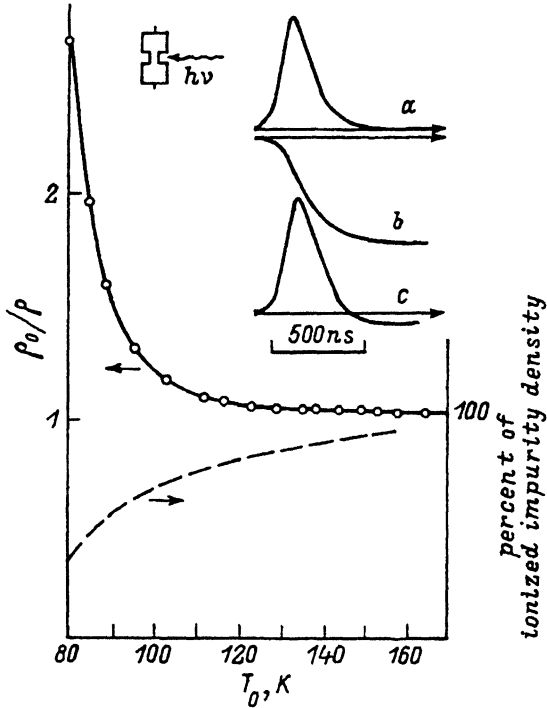


Рис. 3. Температурные зависимости изменения удельного сопротивления монокристаллического  $p$ -Si (точки) при освещении импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера и количества ионизированной примеси согласно [6] (штриховая линия). На вставках — схематическое изображение образца, а также осциллограммы лазерного импульса (а) и фотоотклика (b, c) при  $T_0$ , К: b — 300, c — 80.

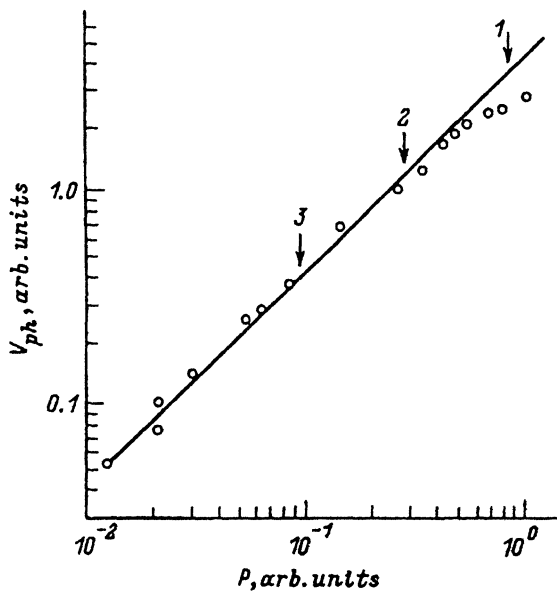


Рис. 4. Вольт-ваттная зависимость фотоотклика  $V_{ph}$  на монокристаллическом  $p$ -Si при  $T_0 = 80$  К. Прямая линия соответствует линейному закону.

вторая и третья составляющие фотоотклика складываются, а при  $V > 0$  конкурируют между собой. Следует обратить особое внимание на зависимость формы фотоотклика от мощности падающего ИК излучения при  $V > 0$  (рис. 2, *a*). Чем можно было бы объяснить тот факт, что с уменьшением мощности лазерного излучения почти в 3 раза, положительный всплеск фотоотклика увеличивается втрое? На рис. 4 стрелками 1, 2 и 3 показаны значения мощности лазерного излучения в соответствии с рис. 2. Из рис. 4 видно, что с переходом по мощности от точки 2 к точке 1 фотоотклик, обусловленный генерацией носителей заряда, начинает насыщаться. В то же время фотоотклик, обусловленный разогревом свободных носителей заряда, согласно [3], имеет линейную вольт-ваттную характеристику в исследуемом диапазоне мощностей. Как отмечалось выше, фотоотклик, представленный на рис. 2, *a*, является результатом конкуренции вышеупомянутых процессов. Поэтому с увеличением мощности лазерного излучения (с переходом от точки 2 к точке 1) увеличивается вклад составляющей фотоотклика, обусловленной разогревом свободных носителей заряда. Этим и можно объяснить уменьшение положительного всплеска (рис. 2, *a*) при увеличении плотности падающей на образец мощности излучения выше  $0.47 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ю. И. Уханов. Оптические свойства полупроводников. М. (1977).
- [2] A. F. Gibson, C. A. Rosito, C. A. Raffo, M. F. Kimmitt. Appl. Phys. Lett., 21, 356 (1972).
- [3] С. Ашмонтас, Э. Ширмулис. ФТП, 20, 2212 (1986).
- [4] С. Стонис, Э. Ширмулис. ПТЭ, вып. 3, 162 (1983).
- [5] С. М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М. (1984).
- [6] S. Li Sheng. Sol. St. Electron., 21, 1109 (1978).

Редактор Л. В. Шаронова

---