

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кашкаров П. К., Козлов С. Н. // Микроэлектроника. 1976. 5, № 5. С. 535. [2] Kashkarov P. K., Kozlov S. N., Kiselev V. F. // Surf. Sci. 1978. 75, N 1. P. 231. [3] Ефимова А. И., Ивакин Г. И., Кашкаров П. К. и др. // Поверхность. 1988. № 9. С. 75. [4] Gibbons J. F., Johnson W. S., Mylroie S. W. Projected Range Statistics. Stroudsburg, Pennsylvania. 1975. [5] Karyagin S. N., Kashkarov P. K., Kiselev V. F., Kozlov S. N. // Phys. Stat. Sol. (a). 1976. 37, N 1. P. 17. [6] Мейер Д., Эрикссон Л., Дэвис Д. Ионное легирование полупроводников. М., 1973. [7] Мошовец Т. В., Холодарь Г. А., Клиггер М. И. и др. // УФН. 1985. 147, № 3. С. 523. [8] Кашкаров П. К., Колесников А. В., Петров А. В. // Микроэлектроника. 1988. 17, № 6. С. 528.

Поступила в редакцию
28.09.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31. № 4

УДК 539.293:537.87

ЛАЗЕРНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

А. Н. Бачурин, А. В. Козарь, С. А. Крупенко

(кафедра радиофизики)

Рассмотрено взаимодействие непрерывного СВЧ-излучения 8-мм диапазона длин волн и лазерного излучения ближней ИК-области в слое из чистого кристаллического кремния, расположенном в прямоугольном волноводе и полностью заполняющем поперечное сечение. Предложен экспериментальный метод исследования процессов диффузии фотоносителей, времени жизни носителей заряда.

Взаимодействие электромагнитных волн СВЧ-диапазона и когерентного лазерного ИК-излучения используется в первую очередь для изучения процессов, происходящих в полупроводниках, а также для исследования их свойств в СВЧ [1] и оптических устройствах [2].

В работе рассматривается взаимодействие непрерывного СВЧ-излучения 8-мм диапазона и лазерного излучения ближней ИК-области, распространяющихся в слое из чистого кристаллического кремния вдоль кристаллографической оси (111) (образец полностью заполняет поперечное сечение волновода размерами $7,2 \times 3,4$ мм).

Исследуется случай, когда на образец одновременно воздействуют оба вида излучения, причем непрерывное СВЧ-излучение является достаточно мощным. При этом наблюдалось воздействие на физические параметры полупроводника — концентрация N и подвижность μ свободных носителей — не только температуры образца T ($N^2 = 1,5 \cdot 10^{33} T^3 \exp(\Delta E/kT)$ см $^{-6}$ — квадрат концентрации носителей в случае использования кремния с собственной проводимостью [3]) и величины мощности лазерной фотонакачки P , но и электрической составляющей E СВЧ-излучения [4], так как

$$\mu = \mu_0 (1/2 + \{1 + [1 + (3\pi/8) (\mu_0 E/U)^2]^{1/2}\})^{-1/2},$$

где U — скорость звука в образце, $\mu_0 = 4 \cdot 10^9 T^{-2,6}$ см $^2 \cdot$ В $^{-1} \cdot$ с $^{-1}$ — подвижность свободных носителей заряда в слабом поле [3]. Как показано в [5, 6], коэффициенты отражения Γ и поглощения A являются функциями удельной проводимости $\sigma = Ne\mu$, длины волны СВЧ-излучения λ , толщины образца d_0 , диэлектрической проницаемости ϵ' .

Генерация СВЧ-излучения последовательно осуществлялась на двух частотах: $f_1 = 34,86$ ГГц и $f_2 = 36,02$ ГГц, толщина образца $d_0 = 1,35$ мм является полуволновой для СВЧ-излучения с частотой f_1 , длина волны излучения лазера $\lambda_0 = 1,15$ мкм.

На рис. 1, а представлена теоретическая зависимость квадрата коэффициента отражения $G = |\Gamma|^2$ от частоты СВЧ-излучения f и проводимости σ (при расчетах $\sigma = \sigma(T, E)$ использовалось эмпирическое приближение $T[K] = 293 + 0,5 P_{RF}$ [Вт], примененное к конкретным условиям данного эксперимента). На рис. 1, б представлена аналогичная теоретическая зависимость коэффициента поглощения A . Рис. 1 иллюстрирует случай, когда мощность лазерной накачки $P = 7,5$ мВт. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости квадрата коэффициента отражения G от мощности

падающего СВЧ-излучения P_{RF} на частотах f_1 (а) и f_2 (б), где в качестве параметра фигурирует величина мощности лазерной накачки P .

Эксперименты позволили обнаружить интересный эффект лазерной стимуляции нестационарного поглощения СВЧ-энергии в полупроводнике. Изменение концентрации свободных носителей в полупроводнике вследствие лазерной накачки $P > 4,3$ мВт при величине СВЧ-мощности $P_{RF} > 15$ Вт и частоте $f_2 = 36,02$ ГГц (рис. 2, б) вызывает резкое возрастание квадрата коэффициента отражения СВЧ-мощности G (до 0,30). При этом эксперимент показал, что через образец практически не проходит СВЧ-излучение, т. е. резко увеличивается поглощение СВЧ-энергии; нестационарное поглощение в кремнии не прекращается и после снятия лазерной накачки. Время τ_T установления величины коэффициента отражения после начала нестационарного поглощения изменяется в пределах от 10 до 25 с в зависимости от величины лазерной накачки P .

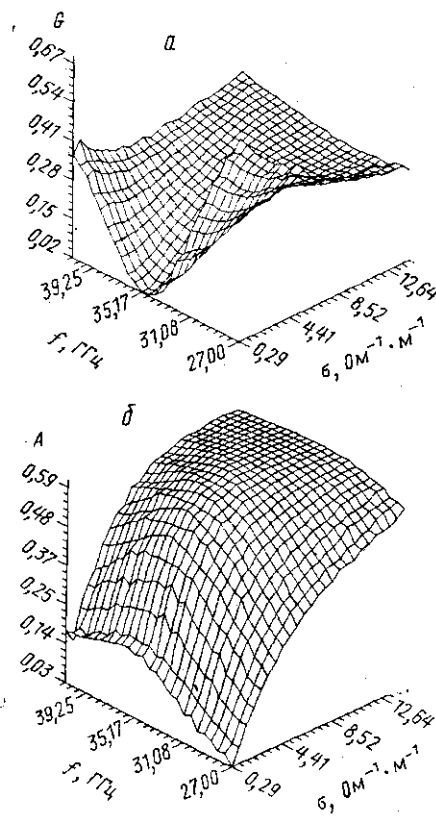


Рис. 1

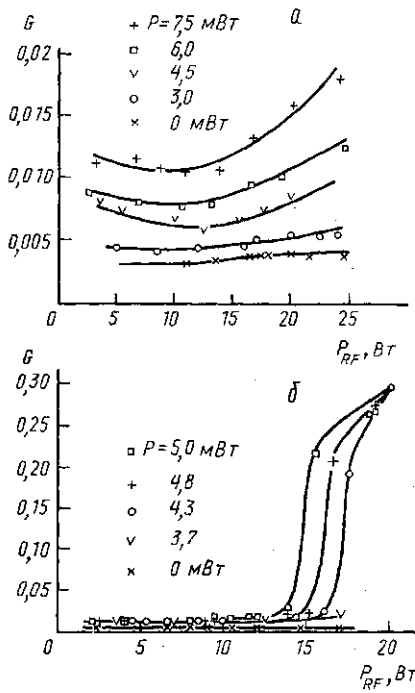


Рис. 2

Наблюдаемый эффект можно объяснить следующим образом. В отсутствие лазерной накачки или при малой ее интенсивности полупроводниковый образец отдает окружающей среде такое же количество теплоты, какое получит за счет поглощения СВЧ-энергии, что и обуславливает стабильность СВЧ-характеристик образца. При воздействии лазерного излучения в объеме образца возникает пространственно-неоднородное диффузионное распределение избыточных носителей зарядов, которое приводит к дополнительному, также пространственно-неоднородному, поглощению СВЧ-энергии в образце, что в свою очередь создает в полупроводниковом слое градиент температуры, вызывающий появление как относительно медленных (секунды или десятки секунд) процессов теплопередачи, так и дополнительных термовозбужденных носителей зарядов в нем.

Как видно из рис. 1, а, квадрат коэффициента отражения G начинает плавно увеличиваться при повышении проводимости σ в случае, когда длина волны СВЧ-излучения близка к резонансной для образца заданной толщины d_0 . Коэффициент поглощения A , как видно из рис. 1, б, резко увеличивается при повышении проводимости σ

и быстро достигает максимального значения ($\sim 0,60$) на частоте, близкой к резонансной.

Нестационарное поглощение необходимо учитывать при исследовании взаимодействия излучений с полупроводниками, при анализе таких явлений, как диффузия фотоносителей, при измерении времени жизни и концентрации носителей зарядов в полупроводниках, при изучении теплообмена и термостабилизации полупроводниковых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Козарь А. В., Крупенко С. А., Макаров В. А. // Тез. докл. XI Всесоюз. конф. по электронике СВЧ. Орджоникидзе. 1986. Т. 2. С. 208. [2] Chang J. et al. // J. Appl. Phys. 1985. 57, N 11. P. 4843. [3] Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника. Киев, 1975. [4] Смит Р. Полупроводники. М., 1982. [5] Вольман В. И., Пименов Ю. В. Техническая электродинамика. М., 1971. [6] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., 1973.

Поступила в редакцию
16.10.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31. № 4

УДК 621.315.592

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСОБО ЧИСТОГО КРЕМНИЯ

В. А. Морозова, О. Г. Кошелев, В. В. Остробородова

(кафедра физики полупроводников)

В спектрах фотопродовимости особо чистого кремния при 80 К обнаружены переходы с участием продольных акустических фононов и экситонов. Показано, что эффективные центры прилипания с концентрацией $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ на 3—4 порядка изменяют эффективное время жизни носителей при 80 К.

Современные методы очистки и выращивания позволяют получать монокристаллы Si с $\rho > 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Сведения о таком материале в литературе весьма ограничены. Исследования показали, что существенную роль в нем играют неоднородности «компенсационного» типа. Об аномальном поведении электрических и гальваномагнитных темновых характеристик *n*- и *p*-Si с $\rho \geq 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 300 К сообщалось в работе [1]. Так как высокоомный Si — основной материал для фотоуправляемых устройств СВЧ, элементов солнечных батарей и других приборов, то важно выяснить влияние внешней подсветки на его основные параметры.

Исследования проведены на тех же образцах, что и в [1], область температур $T = 80\text{—}300 \text{ К}$, $h\nu = 0,5\text{—}1,6 \text{ эВ}$ (монохроматор ИКС-21), интенсивность подсветки $I \leq 10^{17} \text{ квант}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (светодиоды из GaAs).

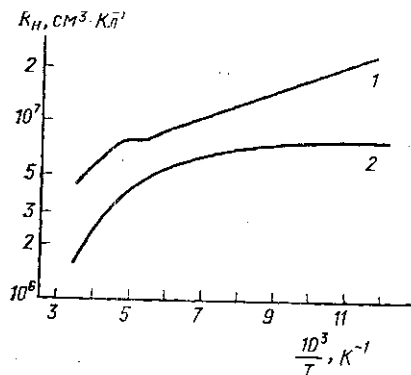


Рис. 1

Выяснено, что в условиях объемной подсветки с $I \geq 10^{15} \text{ квант}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ не наблюдается аномалий в поведении электрических и гальваномагнитных характеристик с изменением T и магнитного поля, т. е. неоднородности перестают играть заметную роль. Для холловских подвижностей наблюдаются зависимости $\mu_{np} \sim T^{-3}$ и $\mu_{nn} \sim T^{-2,1}$, характерные для чистого материала, при этом подсветка с $I \approx 10^{16} \text{ квант}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ практически не изменяет величин μ_n в области 80—230 К. На рис. 1 представлены зависимости постоянной Холла R_H от T для *p*-Si ($\rho = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 300 К), определенные в темновых условиях и при подсветке. Видно, что с повышением T от 80 до 200 К при $I = 0$ концентрация дырок $p = 1/qR_H$ возрастает примерно на $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ за счет полного термического опустошения мелких уровней (кривая 1). Освещение образ-