ведливо известное соотношение между сечениями захвата электрона в возбужденные состояния

$$\sigma_{n_p} = \sigma_{n_{p-1}} \left(\frac{n_p - 1}{n_p} \right)^3, \tag{3}$$

которое следует из ОБК приближения при $n_p \to \infty$ (или при $v \to \infty$). Из рис. 2 видно, что в области $n_p \simeq 3 \div 6$ зависимость сечений захвата от n_p имеет вид $\sigma_{n_p} = \sigma_{n_{p-1}} / 10^{k(Z_p, v)}$, где, как показали настоящие расчеты, коэффициент k является функцией скорости и зарядов взаимодействующих частиц. Предложенный метод позволяет легко рассчитывать указанный коэффициент для различных процессов захвата и, следовательно, более точно учитывать вклад сечений захвата электрона в возбужденные состояния в полное сечение захвата в той области главных квантовых чисел, где «n^{-3}»-аппроксимация не является справедливой.

На рис. 3 приведены сечения захвата электрона протонами из атомов кислорода в зависимости от n_p при энергии налетающих протонов $E_p = 100$ кэВ, а также результаты ОБК и эйконального приближений и данные экспериментов [11—14]. Рассчитанные нами сечения захвата соответствуют экспериментальным результатам, при этом ОБК расчеты завышают, а эйкональные расчеты занижают значения сечений захвата во все рассмотренные состояния. Из рис. 3 видно, что в отличие от предыдущего случая аппроксимация (3) выполняется уже при $n_p \geqslant 2$.

Таким образом, предложенный метод позволяет в области промежуточных и больших энергий рассчитывать сечения захвата электрона в возбужденные состояния при взаимодействии легких ядер с атомами различных газов. Это представляется важным, так как в широкой области изменения энергии и главных квантовых чисел атомных систем «n^{-3}»-аппроксимация является несправедливой. Результаты расчетов сечений захвата электрона налетающими протонами с энергией $E_p = 100$ кэВ в различные возбужденные состояния при взаимодействии с атомами кислорода соответствуют данным экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ryufuku H., Watanabe T.//Phys. Rev. 1979. **A20**, N 5. P. 1828—1837. [2] Bransden B. H., Newby C. W., Noble C. J.//J. Phys. 1980. **B13**, N 21. P. 4245—4255. [3] Omidvar K.//Phys. Rev. 1963. **153**, N 3. P. 121—131. [4] Ford A. L., Reading J. F., Becker R. L.//J. Phys. B. 1982. **15**, N 18. P. 3257—3273. [5] Шурыгина Ю. А., Сенашенко В. С., Теплова Я. А.//ЖТФ. 1986. **56**, № 8. С. 1513—1523. [6] Lin C. D., Soong S. C., Tunnel L. N.//Phys. Rev. 1978. **A17**, N 5. P. 1646—1657. [7] Slater J. C.//Phys. Rev. 1930. **16**, N 1. P. 57—64. [8] Eichler J., Chan F. T.//Phys. Rev. 1979. **A20**, N 1. P. 104—112. [9] Greenland P. T.//Phys. Rep. 1982. **81**, N 2. P. 131—237. [10] Crothers P. S. F.//J. Phys. B. 1981. **14**, N 6. P. 1035—1040. [11] Cocke C. L. et al.//Phys. Rev. 1977. **A16**, N 6. P. 2248—2255. [12] Huges R. H. et al.//Ibid. 1971. **A4**, N 4. P. 1453—1461. [13] Huges R. H. et al.//Ibid. 1970. **A1**, N 3. P. 1424—1432. [14] Huges R. H. et al.//Ibid. 1967. **A164**, N 1. P. 166—170.

Поступила в редакцию
10.06.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 3

РАДИОФИЗИКА

УДК 537:862:621.373.7

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КВАНТОВАТЕЛЯ ФАЗЫ

С. Е. Жмуров, В. Ф. Марченко, И. Т. Трофименко

(кафедра радиофизики СВЧ)

Одним из физических эффектов, лежащих в основе работы твердотельных приемников светового излучения, является изменение под действием света емкости обедненного слоя в полупроводнике [1]. Наиболее удобной для использования в таких фотоварикапах является бескорпусная структура металл—диэлектрик—полупроводник (МДП), для которой относительный коэффициент перекрытия емкости при изменении

интенсивности света достигает значений ~100, а отсутствие омических шумов приводит к достаточно низкому порогу фоточувствительности (10^{-11} Вт/см^2). Это позволяет создать мостовые схемы, чувствительность которых близка к предельной чувствительности систем, использующих эффект фотопроводимости [2]. Поскольку емкость МДП-структуры в области инверсии зависит как от напряжения, так и от интенсивности света, возникает возможность объединить функции фотодатчика и параметрического усилителя. Обсуждение этой схемы, осуществляющей усиление сигнала модуляции модулированного светового пучка, содержится в работе [3].

Повышение чувствительности радиочастотной части приемника и возможность цифровой обработки при измерении интенсивности непрерывного излучения дает схема параметрического квантователя фазы (ПКФ). Как известно [4], изменение баланса ПКФ эквивалентно воздействию внешнего сигнала на частоте субгармоники, меняющего статистику фаз периодически возбуждаемого параметрического контура. Поскольку изменение баланса пропорционально интенсивности света, воздействующего на МДП-структуру в одном из плеч балансного ПКФ, вероятность выпадения фаз 0 или π при многократных запусках ПКФ характеризует величину интенсивности света.

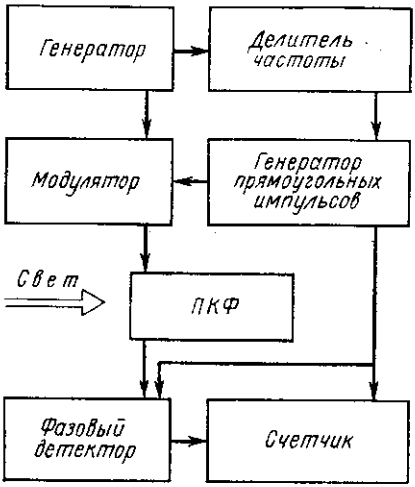

Рис. 1. Блок-схема фотоприемника

Экспериментально исследовался макет параметрического фотоприемника, блок-схема которого изображена на рис. 1. Основной частью является ПКФ, собранный по балансной схеме на двух МДП-структурах типа Al—$SiO_2 \cdot Si_3N_4$—Si с высоким ($\rho \sim 200$ Ом/см) удельным сопротивлением n-полупроводника. Коэффициент перекрытия по емкости структуры составлял ~10 (см. рис. 2). На одну из структур со стороны диэлектрического слоя подавалось сфокусированное излучение непрерывного источника когерентного света ($\lambda = 0{,}63$ мкм, максимальная интенсивность излучения, проникающего в приповерхностный слой полупроводника, $I_0 \approx 0{,}1$ мВт) регулируемой интенсивности. Радиоимпульс накачки, запускающий ПКФ и имеющий длительность, равную 30—50 периодам несущей частоты, формируется в модуляторе из синусоидального напряжения с частотой $f = 2$ МГц с помощью генератора прямоугольных импульсов. Для возбуждения параметрического контура с постоянной фазой импульсный генератор синхронизирован с частотой заполнения через делитель частоты с коэффициентом деления 512. Синхронный фазовый детектор вырабатывает импульсы совпадения фазы субгармоники с опорной фазой, равной 0 или π. Число таких импульсов подсчитывается счетчиком. Отношение числа однополярных импульсов совпадения к общему числу запусков характеризует вероятность нахождения фазы субгармоники в одном из двух устойчивых состояний. Баланс параметрического контура по накачке, определяющий пороговую чувствительность радиочастотной части схемы, составлял —60 дБ.

При настройке ПКФ следует принимать во внимание следующие обстоятельства. Область максимальной крутизны вольт-фарадной характеристики МДП-варикапов, обеспечивающая минимальные амплитуды накачки и мягкий порог возбуждения, и область максимальной чувствительности по свету, как видно из рис. 2, не совпадают. Экспериментально было установлено, что выбор рабочей точки в области слабой инверсии, т. е. напряжений смещения на варикапах $E_0 = (-3 \div -5)$ В, обеспечивает мягкий режим возбуждения [5], однако при этом требуемые амплитуды накачки возрастают до значений $A_н = (1{,}0 \div 1{,}5)$ B. За счет ударного возбуждения контура в схеме возможна систематическая навязка фазы субгармоники; кроме того, при увеличении амплитуды накачки средняя емкость при освещении структуры уменьшается, что в свою очередь уменьшает измеряемый разбаланс контура. Уменьшением крутизны фронтов радиоимпульса накачки при $A_п \sim 1$ В эти нежелательные явления в значительной мере удается устранить. Другая особенность, связанная с использованием облученных МДП-варикапов, заключается в том, что в некотором интервале частот накачки возникает автомодуляционный режим параметрической генерации. Механизм его обусловлен тем, что время релаксации неосновных носителей становится соизмеримым с периодом напряжения накачки [5]. Выбором частоты накачки и частоты повторения радиоимпульсов удается избежать срывов параметрических колебаний за время запускающего импульса.

Относительная интенсивность оценивалась следующим образом. Предварительно

схема в отсутствие освещения балансировалась так, что вероятность выпадения обеих возможных фаз субгармоники становилась одинаковой. При освещении одной из МДП-структур измерялась зависимость отношения $\Delta n/n_0$ (Δn — отклонение числа однополярных импульсов от половины общего числа запускающих импульсов $n_0 = 1000$) от интенсивности I/I_0. Как следует из рис. 3, ход этой зависимости типичен для приемников радиочастотных сигналов с использованием ПКФ [4]. Чувствительность фотоприемника в нашем случае составляла $I/I_0 \sim 10^{-2}$, резерв ее повышения

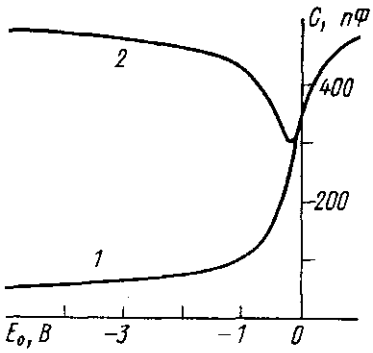

Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры: без подсветки (*1*) и при освещении когерентным источником с интенсивностью $I_0 = 0{,}2$ мВт (*2*)

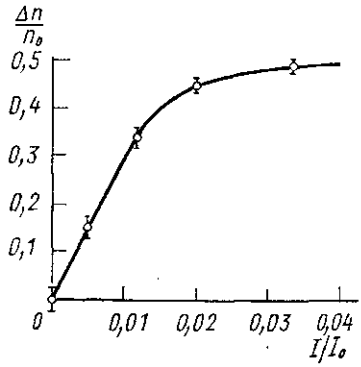

Рис. 3. Зависимость статистики фаз субгармоники от интенсивности освещения ($E_0 = -3$ В). Интервал ошибок вычислен для 10 серий и доверительной вероятности 0,91

заключается в использовании специального оптического согласования на поверхности МДП-структуры. При $I/I_0 \sim 4 \cdot 10^{-2}$ наблюдается полный захват фазы субгармоники (насыщение фотоприемника). Для расширения динамического диапазона можно использовать предварительную расстройку контура, соответствующую захвату другой стационарной фазы. В этом случае $\Delta n/n_0$ меняется от —0,5 до 0,5.

Совмещение в одном элементе функций фотодатчика и параметрического квантователя фазы (усилителя) упрощает конструкцию устройства и обеспечивает высокую чувствительность радиочастотной части приемника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл—диэлектрик—полупроводник. Киев, 1978. [2] Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М., 1980. [3] Пенфильд П., Сойер Д.// //ТИИЭР, 1965. **53**, № 4. С. 393—401. [4] Комолов В. П., Трофименко И. Т. Квантование фазы при обнаружении радиосигналов. М., 1976. [5] Жмуров С. Е., Марченко В. Ф.//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1985. **26**, № 6. С. 40—42.

Поступила в редакцию
15.09.86