

ЛАВИННЫЙ ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ СТРУКТУР
МЕТАЛЛ-РЕЗИСТИВНЫЙ СЛОЙ - ПОЛУПРОВОДНИКА.Г. Г а с а н о в, В.М. Г о л о в и н, З.Я. С а д ы г о в,
Н.Ю. Ю с и п о в

Известно, что одним из недостатков лавинных фотоприемников, изготовленных на основе $p-n$ - переходов и барьеров Шоттки, является высокая вероятность образования в них локальных микропробоев-микроплазм, не позволяющих создать высокочувствительные приборы с большой площадью [1]. В данной работе нами рассмотрен процесс лавинного умножения носителей заряда в структурах металл-резистивный слой - полупроводник (МРП). Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность создания на основе МРП-структур высокочувствительных фотоприемников большой площади.

Рассмотрим планарную МРП-структуру, изготовленную на кремниевой подложке p - типа проводимости с концентрацией примесей $N_a \approx 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Предположим, что рекомбинация носителей заряда в приграничной области полупроводника с резистивным слоем отсутствует. При этом для получения вольт-амперной характеристики (ВАХ) структуры при стационарном обеднении поверхности полупроводника будем использовать уравнение полного тока (J_t), уравнение непрерывности электронной и дырочной компонент полного тока в приграничной области полупроводника с резистивным слоем, уравнение Кирхгофа для полного напряжения (V) и соотношение Миллера [1], связывающее величину коэффициента умножения (M) лавинного процесса с поверхностным потенциалом (ψ_s) полупроводника:

$$J_t = J_{se} + J_{sh} = J_{re} + J_{rh}, \quad J_{re} = J_{se} = M \cdot i_a + i_0, \quad (1)$$

$$V = \psi_s + V_r + J_t \cdot S \cdot \sigma_0^{-1}, \quad M = \frac{1}{1 - \left(\frac{\psi_s}{\psi_0}\right)^m},$$

где J_{se} и J_{sh} - электронная и дырочная компоненты полного тока в приграничной области полупроводника с резистивным слоем, J_{re} и J_{rh} - аналогичные компоненты полного тока в объеме резистивного слоя, V_r - падение напряжения в резистивном слое, σ_0 - полная проводимость внешней электрической цепи, $\psi_0 = 240 \text{ В}$ - напряжение пробоя поверхности полупроводника с концентрацией примеси $N_a \approx 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, i_a - инициирующий лавину электронный ток в полупроводнике, i_0 - избыточный электронный ток, не участвующий в лавинном процессе, m - эмпирический параметр Миллера, величина которого находится в диапазоне (3-6) [2].

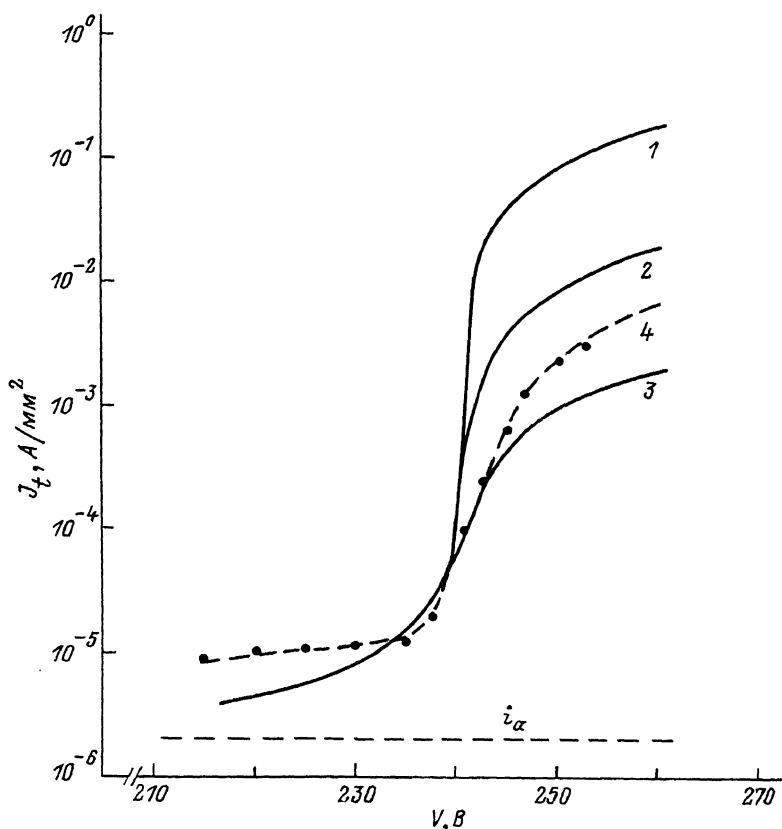


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика лавинной МРП-структуры при $\sigma_h \ll \sigma_e$, $\psi_0 = 240$ В, $m = 5$, $i_a = 2 \cdot 10^{-6}$ А·мм⁻², $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ Вм⁻¹, $S = 25$ мм². 1 - $\sigma_e = 2 \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·мм⁻², $i_0 = 0$. 2 - $\sigma_e = 10^{-3}$ Ом⁻¹·мм⁻², $i_0 = 0$. 3 - $\sigma_e = 10^{-4}$ Ом⁻¹·мм⁻², $i_0 = 0$. 4 - $\sigma_e = \frac{dJ_{re}}{dV_r} = 2KV_r$, $K = 7.7 \cdot 10^{-6}$ А·мм⁻²·В⁻², $i_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ А·мм⁻².

Анализ уравнений (1), выполненный численным расчетом на ЭВМ, показывает, что для достижения высоких коэффициентов умножения лавинного процесса следует уменьшить величину избыточного тока i_0 и отношение $\frac{\sigma_h}{\sigma_e}$, где σ_e и σ_h - проводимость единичной площади резистивного слоя, вызванная электронами и дырками, соответственно. В расчетах предполагался чисто омический тип проводимости резистивного слоя.

На рис. 1. представлена ВАХ МРП - структуры с различными величинами проводимости резистивного слоя (кривые 1, 2 и 3). Видно, что при лавинном умножении носителей заряда в МРП-струк-

туре не требуется высокая стабильность питающего напряжения по сравнению со структурой с ρ - n - переходом или барьером Шоттки, поскольку в МРП-структур, начиная с некоторого напряжения V , превышающего величину ψ_0 , коэффициент умножения лавинного процесса слабо зависит от приложенного напряжения. Путем изменения проводимости резистивного слоя можно управлять величиной M в широких пределах.

Экспериментальные образцы МРП-структур изготавливались методом ионно-плазменного распыления карбида кремния (SiC) на кремниевую подложку p -типа проводимости с удельным сопротивлением, равным $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (или $N_A \approx 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Толщина SiC составляла 0.15 мкм . Затем на слой SiC наносился полупрозрачный для света электрод путем термического испарения алюминия в вакууме. Омический контакт к образцу выполнялся напылением алюминиевого слоя на обратную сторону кремниевой подложки. Электрическое поле в образце создавалось потенциалом, приложенным к полупрозрачному электроду относительно омического контакта.

На рис. 1 представлены экспериментальные точки ВАХ изготовленной МРП-структуры. Видно, что кривая 3, рассчитанная в предложении чисто омической проводимости слоя SiC величиной $\sigma_e = 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ мм}^{-2}$, удовлетворительно описывает ВАХ реальной структуры только в области резкого роста лавинного тока. Расхождение экспериментальных точек от кривой 3 в области низких напряжений объясняется значительной величиной избыточного тока i_0 , не участвующего в лавинном процессе. В структуре $Si-SiC-Al$ избыточный ток достигал величины $i_0 = 5 \cdot 10^{-6} \frac{A}{\text{мм}^2}$. В области напряжений $V > 243 \text{ В}$ отклонение экспериментальных точек от кривой 3 связано с тем, что в области высоких электрических полей сильнее сказывается неомический характер проводимости карбида кремния. Измерения ВАХ при отрицательном потенциале на полупрозрачном электроде образца фотоприемников, а также исследования структур типа $Al-SiC-Cr$ показали, что вольт-амперную характеристику SiC можно описывать функцией $J_{r\phi} = K \cdot V_r^2$, где $K = 7.7 \cdot 10^{-6} \frac{A}{\text{мм}^2 \cdot B^2}$.

Решение системы (1) с учетом вышеуказанных двух замечаний, связанных с избыточным током и с неомической проводимостью слоя SiC , приводит к хорошему согласию расчета с экспериментом (см. кривая 4).

На рис. 2 представлен коэффициент усиления фототока в лавинной МРП-фотоприемнике с резистивным слоем SiC в зависимости от мощности падающего светового импульса. В качестве источника света использовался светодиод АЛ316А. Характерное время нарастания световых импульсов составляло величину, равную 70 нс . Уменьшение коэффициента усиления фототока M при увеличении мощности световых импульсов свидетельствует о том, что в лавинном МРП-фотоприемнике существует отрицательная обратная связь между темпом лавинного процесса и инициирующим током. Указан-

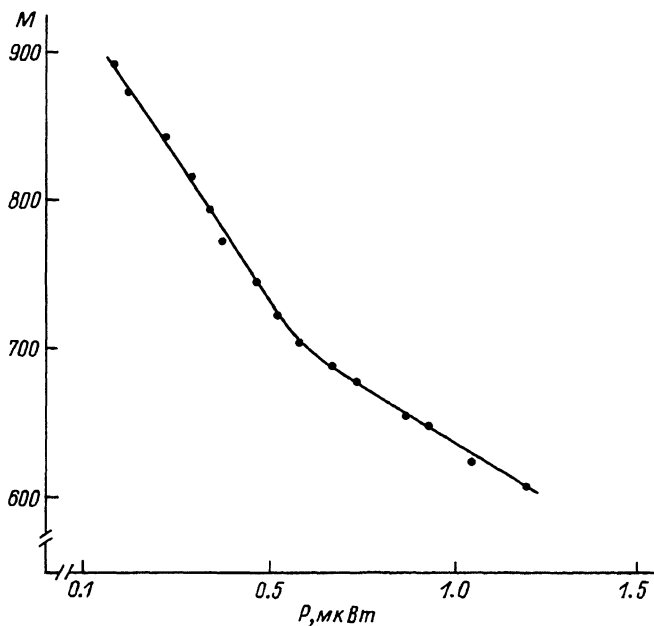


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления фототока от мощности падающего светового импульса.

ная обратная связь действует по всей рабочей площади фотоприемника, что препятствует неограниченному росту лавинного тока.

Таким образом, в МРП-структуре достигается однородный лавинный процесс по всей рабочей площади, обеспечиваемый выбором величины проводимости резистивного слоя, ограничивающего сквозной ток между металлом и полупроводником в области центров, ответственных за микроплазмы. В результате этого нам удалось изготовить образцы лавинного МРП-фотоприемника площадью 25 мм^2 . По своим рабочим параметрам указанный МРП-фотоприемник является адекватным конкурентом лавинным фотодиодом на основе $p-n$ -переходов.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить М.А. Маркова, И.М. Железных за полезные замечания при обсуждении работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Грехов И.В., Сережкин Ю.Н. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. М.: Энергия, 1980. 145 с.
- [2] Видулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1980, 296 с.