

## ПОЛНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

Э.А. ДЖАФАРОВА<sup>1</sup>, З.Я. САДЫГОВ<sup>2</sup>, А.А. ДОВЛАТОВ<sup>3</sup>, Л.А. АЛИЕВА<sup>1</sup>,  
Э.С. ТАПДЫГОВ<sup>1</sup>, К.А. АСКЕРОВА<sup>1</sup>

<sup>1.</sup> *Институт Физики НАНА им. Г.Б. Абдуллаева,  
AZ-1143, пр. Г. Джавида 131, Баку, Азербайджан.*

<sup>2.</sup> *Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980, Дубна, Россия*

<sup>3.</sup> *Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,  
AZ 1014, пр. Азадлыг, Баку, Азербайджан.  
elmiraifan@mail.ru*

Исследована полная проводимость кремниевых микропиксельных лавинных фотодиодов (MAPD) при воздействии малого переменного сигнала различной частоты (10кГц ÷ 1МГц). Показано, что при приложении к подложке n-Si положительного потенциала наблюдается уменьшение барьерной емкости ( $U_{обр}=0 \div 3В$ ) с частотой переменного сигнала, что связано с появлением последовательного сопротивления между двумя эпитаксиальными слоями p – типа проводимости при обеднении лавинного фотодиода. Вычислена концентрация ионизованных акцепторов в эпитаксиальном слое, а также ширина слоя объемного заряда p<sup>+</sup>-р перехода. При приложении к подложке n-Si MAPD структуры отрицательного потенциала наблюдается экспоненциальный рост емкости с напряжением  $U_{пр}$  и при выполнении условия  $U_{пр} = U_{инв}$  происходит изменение знака реактивности (индуктивный эффект).

**Ключевые слова:** микропиксельный лавинный фотодиод, емкость и проводимость p-n перехода, индуктивность p-n перехода

**PACS:** 66.30. Jt; 71.55

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получили лавинные фотодиоды с отрицательной обратной связью, гасящей лавинный процесс. Это позволило создать лавинный фотодиод, работающий в так называемой «гейгеровской» моде (APDg). Такой фотодиод обладает высоким коэффициентом усиления ( $10^5 \div 10^7$ ), однако он не способен регистрировать количество рожденных фотоэлектронов под действием падающего света. Разработанный в последние годы Si микропиксельный лавинный фотодиод (MAPD) позволяет решить проблему с регистрацией интенсивности излучения. MAPD обладает высокой технологичностью, а также имеет высокую чувствительность и эффективность детектирования фотонов [1-4].

Конструкция MAPD с высокой плотностью расположенных в глубине p<sup>+</sup>- областей (пикселей) подробно описана в работах [1,4]. MAPD имеет сложную многослойную структуру: так в сечениях, проходящих через n<sub>рх</sub><sup>+</sup>-области, имеются три p-n перехода, а в сечениях, не проходящих через эти области – только один p-n переход (подложка-эпитаксиальный слой).

Фотоэлектрические свойства исследуемых структур, такие как коэффициент умножения, эффективность детектирования фотонов, температурная зависимость коэффициента усиления и т.п. рассмотрены в [2-4].

Представлял интерес исследовать физические процессы, происходящие в многослойных MAPD структурах с целью определения их основных параметров. Для этого было изучено изменение емкости под действием приложенного напряжения в

обратном (положительный потенциал приложен к подложке n-Si) и прямом направлениях (отрицательный потенциал приложен к n-Si) при различных частотах малого переменного сигнала.

Необходимо отметить, что величина емкости исследуемых структур и ее изменение под действием внешних факторов сильно влияет на время восстановления параметров этих структур.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения емкости проводились с помощью моста полных проводимостей МПП-300, а также по схеме, описанной в [5]. Частота переменного сигнала варьировалась от 10кГц до 1МГц.

В качестве исследуемого образца был выбран MAPD-3N, имеющий рабочее напряжение  $U_{проб}=90.2 В$  и эффективность детектирования фотонов РДЕ=30%. Как отмечалось в [5], в процессе технологических операций создаются три последовательно соединенных p-n перехода и расчеты показали, что общая измеряемая емкость приблизительно равна половине емкости первого p<sup>+</sup>-р перехода  $C_{общ} \approx \frac{1}{2} C_1$ , при этом слой объемного заряда охватывает оба эпитаксиальных слоя p-типа.

Зависимость барьерной емкости p-n переходов, полученных методом эпитаксии, от приложенного напряжения описывается выражением, которое справедливо для случая резкого распределения концентрации ионизованных примесей (акцепторов или доноров) в p-n переходе:

$$N_A = \frac{2dU_{обр}}{S^2 q \epsilon \epsilon_0 d \left( \frac{1}{C_D} \right)}$$

где  $S$ - площадь p-n перехода,  $\varepsilon$ - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon_0$ - диэлектрическая постоянная вакуума ( $\varepsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м),  $q$ -заряд электрона,  $U_{обр}$ - приложенное напряжение,  $C_D$ -емкость диода.

Исследования зависимости емкости фотодиода MAPD-3N от приложенного напряжения показали, что при малых значениях  $U_{обр} = (0 \div 3)$ В наблюдаемое уменьшение  $C(U_{обр})$  сильно выражено при частоте переменного сигнала  $f=10$  кГц, с увеличением частоты эта зависимость значительно ослабляется ( $f=1$ МГц (рис.1)

Зависимость величины емкости от частоты в области малых напряжений (0-3В) связана с особенностью конструкции исследуемого образца MAPD. Наличие матрицы из  $n^+$ -областей между двумя эпитаксиальными слоями  $p$ - типа проводимости приводит к появлению некоторого эффективного сопротивления между эпитаксиальными слоями. Поскольку обедненный слой начинается на границе подложки с первым эпитаксиальным слоем, то вышеупомянутое эффективное сопротивление становится последовательно соединенным с измеряемой емкостью. Естественно, влияние этого сопротивления на величину измеряемой емкости будет зависеть от частоты переменного сигнала: чем выше частота, тем сильнее это влияние.

Из измерений емкости вычислена ширина объемного заряда  $W$ : при  $U_{обр} = (0 \div 3)$ В она резко возрастает от 0,8 до 2,9 мкм ( $f=10$  кГц), а при  $f=1$ МГц  $W=1,4 \div 3,5$  мкм. При дальнейшем увеличении  $U_{обр} = (0 \div 20)$ В  $W=5$ мкм и не зависит от частоты. Анализ зависимости  $C^2(U_{обр})$  позволил выявить три наклона, из которых была определена концентрация ионизованных акцепторов:  $N_{A1}=(2.1 \div 2.7)10^{20} \text{ м}^{-3}$  при  $U_{обр}(0 \div 3)$ В,  $N_{A2}=1.03 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  ( $U_{обр}=3 \div 10$ )В и  $N_{A3}=(1.86 \div 2.4) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  ( $U_{обр}=10 \div 20$ )В.

Как отмечалось в [1,7], MAPD структуры работают в режиме лавинного умножения, когда к подложке n-Si приложен положительный потенциал. Для расширения области применения этих приборов и выявления механизма инерционных процессов был исследован полный импеданс структуры при приложении отрицательного потенциала к подложке n-Si.

При отрицательном потенциале на подложке n-Si первый переход смещается в прямом направлении (рис.2), а средний p-n<sup>+</sup><sub>px</sub> переход в обратном направлении, поэтому в физических процессах, протекающих в исследуемых структурах, основную роль играет первый.

Как видно из рис. 2, при малых значениях  $U_{пр}$  наблюдается слабая зависимость емкости структуры от напряжения и частоты, то есть измеряемая емкость обусловлена изменением концентрации неподвижных акцепторов в области объемного заряда первого p<sup>+</sup>- p перехода. Начиная с  $U_{пр}=0.3$  В, емкость экспоненциально возрастает с приложенным напряжением:

$$C_{пр} = const \cdot \exp \frac{qU}{\beta_c kT}$$

здесь  $q$  - заряд электрона,  $T$ -температура,  $k$  - постоянная Больцмана, безразмерный коэффициент  $\beta_c$  ( $\beta_c \approx 3 \div 3,5$ ).

Напряжение инверсии не зависит от частоты переменного сигнала и в пределах ошибки эксперимента меняется в пределах  $(550 \pm 5)$  мВ при изменении частоты от 50 до 500 кГц. Здесь для удобства значения отрицательной емкости  $C^-$  представлены в первом квадранте. На кривой зависимости  $C(U_{пр})$  при определенном значении  $U_{макс} < U_{инв}$  наблюдается максимум, после чего емкость резко уменьшается до нуля, переходит в отрицательную емкость (эквивалентную индуктивность).

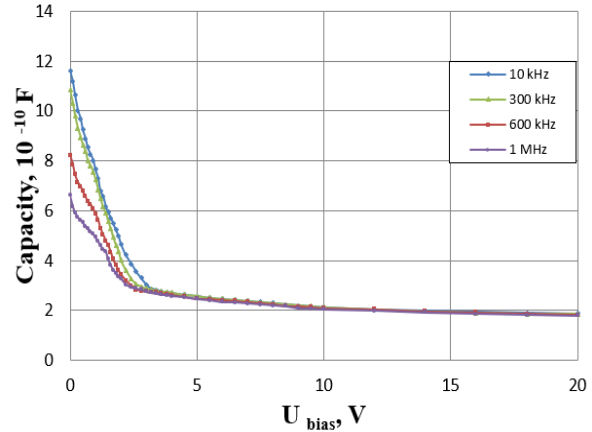


Рис.1 Зависимость емкости фотодиодов MAPD- 3N от приложенного напряжения при различных частотах.

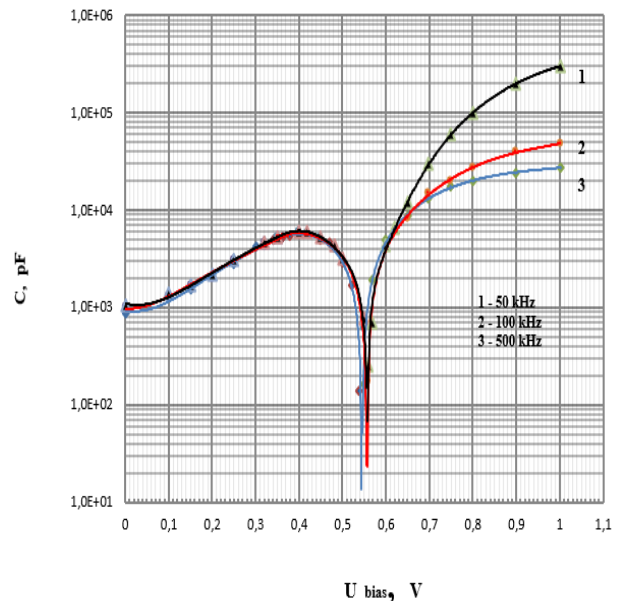


Рис.2. Зависимость емкости микропиксельных лавинных фотодиодов (MAPD 3N) от напряжения (отрицательный потенциал приложен к n-Si) при трех частотах переменного сигнала (50, 100 и 300 кГц).

Несмотря на то, что исследуемые MAPD структуры изготовлены методом эпитаксиального наращивания [8], закон изменения емкости с приложенным напряжением такой же, как для резких p-n переходов, для которых, в отличие от линейных p-

$n$  переходов, отсутствует зависимость напряжения инверсии от частоты.

При малых значениях напряжения на структуре, когда  $U_{пр}$  порядка диффузионной разности потенциалов, как в области первого  $n^+p$  перехода, так и в приконтактной области подложки Si, концентрация подвижных носителей мала и реактивность носит емкостной характер. С увеличением  $U_{пр}$  концентрация подвижных носителей в области объемного заряда первого  $n^+p$  перехода возрастает настолько, что это может привести к изменению проводимости базовой области. Модуляция сопротивления базы может наблюдаться даже при небольших токах, недостаточных еще для изменения сопротивления всей базовой области, но вызывающих медленное увеличение проводимости некоторой ее части. Изменение проводимости базовой области приводит к проявлению ее инерционных свойств и реактивность носит индуктивный характер. Ранее в работе [9] было показано, что импульсные характеристики напряжения на диоде при больших уровнях инжекции проявляют пик напряжения, как это имеет место при прохождении импульса тока через индуктивность, тогда как при низких уровнях наблюдается искажение импульса, присущее емкости.

Активная составляющая полной проводимости  $G$ , измеренная непосредственно на мосте, резко возрастает с приложенным напряжением и достигает своего максимального значения 70 мСм при  $U=1$  В ( $f=300$  кГц).

Знание величины емкости  $C$  и проводимости  $G$  позволяет рассчитать сдвиг фаз, возникающий между током и напряжением  $tg\varphi = \frac{\omega C}{G}$ , где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота переменного сигнала (рис.3).

Как видно из графика, при  $U_{пр} < U_{инв}$   $\varphi > 0$ , т.е. реактивное сопротивление носит емкостной характер, а при  $U_{пр} > U_{инв}$   $\varphi < 0$  и реактивное сопротивление ведет себя как индуктивность. В точке инверсии  $U_{инв} = 0,55$  В,  $\varphi = 0$  и в этом случае сопротивление MAPD структуры имеет чисто активный характер. Плотность прямого тока в точке инверсии составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>.

Величина эквивалентной индуктивности  $L$ , пересчитанная от величин отрицательной емкости  $C^-$ , для исследуемых структур при двух частотах (100 и 500 кГц) и комнатной температуре представлена на рис.4.

При этом концентрация инжектированных неосновных носителей  $P_n^{инж}$  варьировалась изменением силы тока смещения в диапазоне от 0 до 10 мА в пределах  $10^6 \div 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Инверсия емкости в эквивалентную индуктивность наступает при  $P_n^{инж} \approx n_n \approx 7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> где  $n_n$  – концентрация основных носителей в  $n$ - Si подложке. Из рис. 4 видно, что с ростом прямого смещения  $L$  резко уменьшаясь, стремится к постоянному значению и максимальное значение  $L$  при  $U_{пр} = 0.6$  В составляет  $\sim 50$  мкГн. Это значение существенно больше величин пленочных планарных индуктивностей (спиралей)  $\sim 15$  мкГн, имеющих максимальный диаметр спирали не более 10 мм и число витков не менее 100, используемых в интегральных микросхемах [10]. Таким образом,

структуры, полученные по аналогичной технологии создания MAPD с первым  $n^+p$  -переходом, смещенным в прямом направлении, можно использовать в качестве «катушек» индуктивности.

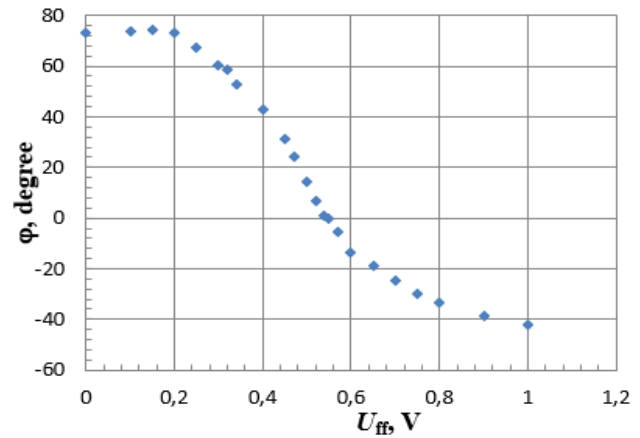


Рис.3 Зависимость угла сдвига фаз между током и напряжением от прямого смещения при  $f=500$ кГц

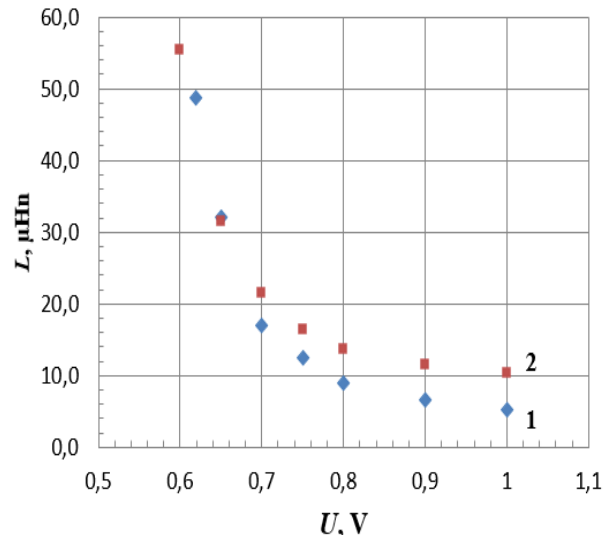


Рис.4 Зависимость величины индуктивности от прямого смещения при двух частотах переменного сигнала 1-100кГц, 2-500 кГц

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что изменение емкости от частоты переменного сигнала в области малых напряжений (0-3В) (положительный потенциал приложен к подложке  $n$ -Si) связано с особенностью исследуемых структур. Наличие матрицы из  $n_{рх}^+$ -областей между двумя эпитаксиальными слоями  $p$ - типа проводимости приводит к появлению некоторого эффективного сопротивления между этими слоями, которое последовательно соединяется с измеряемой емкостью. Вычислена ширина объемного заряда, а также концентрация ионизованных акцепторов в эпитаксиальном слое.

При отрицательном потенциале, приложенном к подложке  $n$ -Si и при выполнении условия  $U_{пр} = U_{инв}$  исследуемые диоды проявляют индуктивные свойства, связанные с изменением проводимости

## ПОЛНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

кремниевой подложки  $n$ -Si вследствие значительного увеличения концентрации подвижных носителей и накопления заряда в области первого  $n^+$ - $p$  перехода. Величина отрицательной емкости, пересчитанная к значению индуктивности, составляет

50 мГн при  $U_{пр} = 0.65$  В ( $f = 100$  кГц), которая значительно превышает индуктивность полупроводниковых плоских спиралей (15 мГн), используемых в интегральных микросхемах.

- 
- [1] З.Я. Садыгов. Микроканальный лавинный фотодиод. Патент России №2316848, приоритет от 01.06.2006
- [2] N.V. Anfimov, I. Chirikov-Zorin, A.A. Dovlatov et al. Beam test of Shashlyk EM calorimeter prototypes readout by novel MAPD with super high linearity, Nucl. Instr. Meth. A, 2010, 617, pp 78–80
- [3] Z.Y. Sadygov, F. Zerrouk, A.A. Dovlatov et al. Performance of new mikro-pixel avalanche photodiode sfrom Zecotek Photonics, Nucl. Instr. Meth. A, 2009, 610, pp381-383
- [4] А.А. Довлатов. Исследование температурных свойств новых микропиксельных лавинных фотодиодов, АЖФ Физика, 2009, XV, №2, с.180-182
- [5] Э.А. Джафарова, З.А. Искендерзаде, А.А. Довлатов, Л.А. Алиева, Э.С. Тантыгов. Емкостные свойства микропиксельных лавинных фотодиодов АМЕА Хəбərləri, Fizika-texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya 2013, с. XXXII, № 2, s.526-533
- [6] Z. Y. Sadygov et al. On features of potential distribution in avalanche photodiodes with deeply buried pixels, АЖФ Физика 2013, XIX, № 2, Sect.En, pp 17-19
- [7] З.Я. Садыгов и др. Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности. Письма в ЖТФ, 2010, т.36, в.11, с.83-89
- [8] Е.А. Джафарова., З.У. Садыгов et al. Barrier capacitance of micropixel avalanche photodiodes in different frequency, Proc.10<sup>th</sup> International Conference on Technical and Physical Problems Of Electrical Engineering, 2014 Baku, Azerbaijan, 247-251
- [9] Э.А. Джафарова. “Глубокие примеси в Ge, Si и нестационарные электронные процессы в барьерных структурах на их основе” Диссертация на соискание ученой степени док. физ.-мат. наук, 2007, Баку, Институт Физики, НАНА
- [10] Н.А. Поклонский, С.В. Шпаковский и др. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых  $p^+$ - $n$  переходов, облученных быстрыми электронами, ФТП, 2006, т.40, в.7, с.824-828